

TAMPEREEN YLIOPISTO

Johtamiskorkeakoulu

# **Energiankulutuksen ja bruttokansantuotteen kasvun suhde Euroopassa**

Taloustiede

Pro Gradu –tutkielma

Huhtikuu 2017

Ohjaaja: Jukka Pirttilä

Samuli Mäkelä

## TIIVISTELMÄ

Tampereen yliopisto

Johtamiskorkeakoulu

MÄKELÄ, SAMULI: Energiankulutuksen ja bruttokansantuotteen kasvun suhde Euroopassa

Pro Gradu –tutkielma: 90 sivua, 7 liitesivua

Taloustiede

Huhtikuu 2017

Avainsanat: Energia, exergia, ympäristotalous, Eurooppa.

---

Energiankulutuksen ja talouskasvun suhdetta, sekä kausaalisuhdetta on vuosikymmenten saatossa tutkittu paljon. Aiheen tutkiminen on tärkeää, sillä energiankulutuksen ympäristövaikutukset ja huoltovarmuustekijät saattavat vaikuttaa yhä enemmän negatiivisesti elinympäristöömme esimerkiksi ilmastonmuutoksen kautta ja sen takia, että suuri osa energiastamme saadaan kirjoitushetkellä uusiutumattomista energianlähteistä.

Tutkimus on jaettu kirjallisuuskatsausosaan ja empiiriseen osaa. Kirjallisuuskatsausosiossa tarkastellaan energiankulutuksen ja bruttokansantuotteen kehityksen suhdetta Euroopassa perinteisten makrotalousmallien, kuten Solowin kasvumallin, sekä ympäristötaloustieteen mallien kautta. Osiossa tarkastellaan myös energian roolia teollisessa vallankumouksessa, sekä energian ja muiden tuotannontekijöiden, kuten pääoman substituoitavuutta. Kirjallisuuskatsauksen lopuksi esitellään kooste aiheesta jo olemassa olevien tieteellisten tutkimusten tuloksista.

Empiirisessä osassa tarkastellaan kuuden Euroopan maan bruttokansantuotteen ja teollisuustuotannon kehitystä, sekä energian-, ja sähkönkulutuksen yhteyttä stationaarisen tai yhteisintegroivan relaation kautta, sekä pyrkimällä ottamaan aineiston mahdollinen rakenteellinen muutos huomioon. Testattava aineisto on suurimmaksi osaksi vuosidataa vuosien 1960-2015 väliltä. Aineistolle pyritään löytämään yhteisintegroiva relaatio testaamalla aikasarjan integroituneisuuden astetta, tutkimalla muuttujien välistä tasapainorelaatiota ja tarkastelemalla tasapainorelaatioyhtälöiden jäännöstermien stationaarisuutta. Mikäli relaatio löydetään, pyritään muuttujille muodostamaan virheenkorjausmalli.

Saatujen tulosten mukaan energian ja muiden tuotannontekijöiden substituointi on rajallista ja energialla on huomattavasti meno-osuuttaan merkittävämpi rooli taloudessa. Energialla on myös ollut merkittävä rooli teollisessa vallankumouksessa, sekä yhteiskunnan siirtymisessä maatalousvaltaisesta teolliseen yhteiskuntaan. Empiirisessä osiossa tai aiempien tutkimusten kirjallisuuskatsauksien ei kuitenkaan löydetä tilastollisesti merkitsevää ja yhdensuuntaista kausaalisuhdetta bruttokansantuotteen kehityksen, teollisuustuotannon tai energiamuuttujien väliltä. Löydösten perusteella energiansäästötoimia voidaan siis toteuttaa ilman suoraa negatiivista vaikutusta bruttokansantuotteen kehitykseen.

## Sisällysluettelo

<b>1. Johdanto .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Energian merkitys taloudessa.....</b>	<b>4</b>
2.1 Energiatyypit ja niiden taloudellinen hyödyntäminen .....	4
2.2 Energian asema perinteisissä makrotalouden kasvumalleissa .....	7
2.3 Energian asema ympäristötaloustieteen malleissa.....	11
2.4 Energiamuuttuja Solowin kasvumallissa.....	22
<b>3. Energiankulutuksen ja BKT:n historiallinen suhde .....</b>	<b>27</b>
3.1 Malthusilainen talous ja energia .....	27
3.2 Teollinen talous ja energia.....	30
<b>4. Energia tuotannontekijänä ja energiatyyppien substituointi .....</b>	<b>37</b>
4.1 Pääoma energian substituuttina .....	37
4.2 Energiatyyppien substituointi keskenään .....	47
4.3 Teknologisen kehityksen vaikutus energiankulutukseen.....	48
<b>5. Empiiristen tutkimusten tuloksia energiankulutuksen ja BKT:n kasvun suhteesta.....</b>	<b>55</b>
<b>6. Empiirinen osa: energiankulutuksen, sähkönkulutuksen ja reaalisen BKT:n suhde Euroopassa</b>	<b>61</b>
6.1 Tutkimusongelma ja testausmenetelmät.....	61
6.2 Testaus ja tulokset, bruttokansantuote .....	68
6.3 Testaus ja tulokset, teollisuustuotanto .....	78
<b>7. Johtopäätökset .....</b>	<b>84</b>
<b>LÄHTEET.....</b>	<b>86</b>
<b>LIITTEET .....</b>	<b>91</b>

## 1. Johdanto

Energian ja talouskasvun yhteyttä on tutkittu paljon niin empiirisesti kuin teorian pohjalta. Energian ja bruttokansantuotteen välisen suhteen tutkiminen on tärkeää, sillä energiantuotannolla on vaikutuksia ympäristöön ja merkittävä osa esimerkiksi Suomen energiasta saadaan uusiutumattomista energianlähteistä, kuten hiilestä ja polttoaineista. Suuri osa energiasta täytyy tuoda ulkomailta, mikä vaikuttaa siten mahdollisesti kauppataaseen heikkenemisen myötä bruttokansantuotteeseen negatiivisesti. Energian tuonti heikentää myös yhteiskunnan huoltovarmuutta, sillä yhteiskunnan elintärkeät toiminnot, kuten liikenne, ovat nykyhetkellä pitkälti riippuvaisia ulkomailta tuoduista polttoaineista.

Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, mikä on energiankulutuksen ja bruttokansantuotteen muutoksen suhde, sekä miten kyseinen suhde on syntynyt, miten se on kehittynyt ajan myötä ja kuinka se tulee mahdollisesti muuttumaan tulevaisuudessa. Tutkimuskysymyksiin pyritään vastaamaan aiempien tutkimusten pohjalta, esittelemällä ongelma yleisten makrotalousmallien puitteissa, sekä taloushistoriallisen aineiston perusteella. Makrotalousmallien perusteella pyritään vastaamaan siihen, mikä rooli energialla on taloudessa ja miten energian vaikutusta bruttokansantuotteeseen voidaan tarkastella esimerkiksi Solowin kasvumallin puitteissa. Taloushistoriallisen tutkimuksen perusteella pyritään vastaamaan kysymykseen, miten talouden ja energian suhde on muuttunut siirryttäessä esiteollisesta taloudesta teolliseen aikaan. Energian merkitystä tuotannontekijänä ei myöskään juuri ole käsitelty yleisimmissä makrotalousmalleissa, kuten Solowin kasvumallissa tai IS-LM – mallissa.

Empiirisillä tutkimuksilla pyritään löytämään mahdollinen energiantuotannon ja talouskasvun kausaalisuussuhde. Suhteen löytäminen on tärkeää, sillä sen perusteella voidaan mahdollisesti tehdä politiikkasuosituksia. Mikäli energiankulutus aiheuttaa talouskasvua, tulisi energian tuotantoa lisätä kokonaistuotannon kasvattamiseksi. Mikäli talouskasvu aiheuttaa energiankulutusta, tulisi energian saannin turvaamisen olla tärkeä osa talouspolitiikkaa. Mikäli energiankulutuksella ja talouskasvulla ei ole yhteyttä, voidaan energiansäästötoimia lisätä ilman negatiivisia vaikutuksia kokonaistalouteen.

Kausaalivaikutuksen hahmottamista vaikeuttavat muun muassa maiden erilaiset kehitystasot, ilmasto, instituutiot, energian verotuserot ja tilastollisen aineiston puutteet. Tässä tutkimuksessa keskitytään siksi Euroopan alueelle, joka on teollistunutta aluetta, jossa on kehittyneet instituutiot, sekä saatavilla kattavia tilastoja. Teollistuminen lähti myös liikkeelle Euroopasta, mikä tarjoaa mahdollisuuden tarkastella energian ja bruttokansantuotteen suhteen kehittymistä teollistumisen alkuhetkistä nykypäivään. Kyseinen ajanjakso antaa mahdollisuuden tarkastella myös instituutioiltaan suhteellisen samankaltaisia maita, joiden merkittävä ero oli energian saatavuus. Euroopan tasolla voidaan siksi tarkastella talouskasvun ja energiankulutuksen suhdetta siirryttäessä maatalousvaltaisesta ns. Malthusilaisesta taloudesta teollistuneeseen talouteen.

Tutkimus on jaettu seitsemään kappaleeseen, joista kappaleet 2-5 käsittelevät energian ja talouskasvun suhdetta lähinnä teoreettiselta pohjalta empiiristen ja teoreettisten tutkimusten tuloksiin viitaten. Kappaleessa 6 tehdään oma empiirinen tutkimus aiheesta. Kappaleessa 7 käsitellään tutkimuksen johtopäätökset.

Kappaleessa 2 käydään läpi energiatyyppejä ja vertaillaan energian asemaa perinteisissä makromalleissa, kuten Solowin kasvumallissa, sekä ympäristötaloustieteen tutkimuksissa ja -malleissa. Näihin sisältyvät esimerkiksi sähköenergian ja lämpöenergian erittely ja eri energiatyyppien hyödyntämisen erilaiset kustannusrakenteet. Lisäksi käsitellään energiaa osana Solowin kasvumallia. Malli perustuu Sternin & Kanderin (2012) tutkimukseen, jossa Solowin perinteiseen kasvumalliin on lisätty energiamuuttuja.

Kappaleessa 3 käydään läpi energian merkitystä talouden eri kehitysvaiheissa, kuten siirryttäessä esiteollisesta taloudesta teolliseen talouteen ja energian roolia sekä esiteollisessa, että teollisessa taloudessa. Kappaleessa pyritään historiallisiin esimerkeihin selvittämään, mikä rooli energialla on ollut esimerkiksi teollisessa vallankumouksessa ja olisiko teollinen vallankumous ollut mahdollinen ilman halpoja energianlähteitä. Lisäksi kappaleessa käydään läpi tutkimuksia energiankulutuksen ja BKT:n suhteen kehityksestä, sekä pyritään selittämään talouskasvua energiankulutuksella.

Kappaleessa 4 tarkastellaan energian ja pääoman, sekä energiatyyppien välistä substituuotiota teoreettisesti ja empiirisesti. Energiatyyppien keskinäisessä substituoinnissa tarkastellaan erityisesti sitä, voidaanko eri energialajeja, kuten lämpövoimaa ja sähkövoimaa substituoida ilman merkittäviä kustannuksia tai muita rajoitteita. Osiossa tarkastellaan myös teknologisen kehityksen vaikutusta energiankulutukseen esimerkiksi tulo-, ja substituuotiovaikutusten kautta.

Kappaleessa 5 esitellään energiankulutuksen ja BKT:n kasvun kausaalivaikutusta tutkivia empiirisiä tuloksia ja verrataan niitä aiemmissa osioissa saatuihin teoreettisiin malleihin. Tarkasteltavat tutkimukset käyttävät hyväkseen pääasiassa Engle-Granger –kausalisuustestejä, sekä yksikköjuuritestejä tutkiessaan bruttokansantuotteen ja energiankulutuksen yhteyttä. Kyseiset mallit pyrkivät selvittämään tarkasteltavien muuttujien välisiä samanaikaisia riippuvuussuhteita yhdellä tai useammalla endogeenisellä selittävällä muuttujalla.

Kappaleessa 6 toteutetaan empiirinen tutkimus, jossa tutkitaan reaalisen bruttokansantuotteen, teollisuustuotannon, sekä sähkön-, että energiankulutuksen suhdetta useassa eri Euroopan maassa vuosien 1960-2015 välisenä aikana. Empiirisen osan tutkimusongelmana on tarkastella, selittääkö korkeamman hyötysuhteen energianlähteisiin, kuten sähköenergiaan siirtyminen bruttokansantuotteen ja kokonaisenergiankulutuksen trendien eriytymistä Isossa-Britanniassa, Ranskassa, Belgiassa, Alankomaissa, Itävallassa, sekä Ruotsissa. Kausaalinen yhteys pyritään saamaan selville Engle-Granger –testillä stationaarisille tai yhteisintegroituneille muuttujille.

Kappaleessa 7, eli Johtopäätökset -osiossa keskustellaan siitä, onko energian kulutuksella tutkimuksessa esiteltyjen löydösten perusteella merkitystä BKT:n kasvussa ja jos on, mihin suuntaan kausalisuus on? Kausalisuhde voi olla BKT:stä energiankulutukseen, energiankulutuksesta BKT:hen, molempiin suuntiin tai voi olla, että minkäänlaista kausalisuhdetta ei ole. Lisäksi annetaan yhteenveto eri tuotannontekijöiden ja energian suhteesta ja niiden mahdollisista substituuotimahdollisuuksista ja pohditaan, ottavatko nykyiset makromallit tarpeeksi huomioon energian roolia taloudessa.

## 2. Energian merkitys taloudessa

### 2.1 Energiatyypit ja niiden taloudellinen hyödyntäminen

Eri energiatyyppejä on olemassa useita. Energianlähteet voidaan jakaa uusiutuviin ja uusiutumattomiin energianlähteisiin. Uusiutuvat energianlähteet ovat usein ns. Flow (virta) – tyyppisiä energianlähteitä, kuten tuulivoima tai auringonvalo. Toinen merkittävä energianlähde ovat ns. Stock (varasto) –tyyliset, ainoastaan geologisella aikavälillä uusiutuvat energianlähteet, kuten kivihiili, öljy, sekä maakaasu. Nämä uusiutumattomat energiavarat ovat perua miljoonia vuosia sitten kuolleesta eloperäisestä aineesta, joka on saanut energiansa tavalla tai toisella auringonvalosta. Stock –tyypin energiavarat ovat siis ikään kuin pitkällä aikavälillä kasautuneita Flow –tyypin energiavirtoja. Tyypillistä näille kahdelle eri energiatyypille on se, että uusiutumattomien energianlähteiden hyödyntäminen taloudellisiin tarkoituksiin on yleisesti ottaen halpaa, kun taas uusiutuvien energianlähteiden hyödyntäminen on nykyteknologialla kalliimpaa johtuen niistä käyttöenergiaksi muuttavan pääoman alhaisesta hyötysuhteesta ja kalleudesta. Myös esimerkiksi uraani ja muut ydinvoiman tuotannossa hyödynnettävät energianlähteet ovat uusiutumattomia, mutteivat perua menneistä flow-energianlähteistä, kuten fossiiliset polttoaineet. (Hall & Murphy, 2012, 223-251)

Myös biopolttoaineet ja lihastyö ovat perua auringonvalon tuomasta energiasta, eli auringon energiavirroista. Esimerkiksi työeläinten ravintona on rehu, joka on hyödyntänyt auringonvaloa fotosynteesin avulla. Tällä tavalla lähes kaikki biologinen elämä on riippuvaista auringon energiasta. Biopolttoaineita, kuten metsää, voidaan hyödyntää vain tietty määrä kerrallaan, sillä metsän uusiutuminen kestää tyypillisesti vuosikymmeniä. Sama pätee esimerkiksi kalastukseen tai metsästyksen. Uusiutumattomia luonnonvaroja taas voidaan hyödyntää suunnattomia määriä lyhyen ajan kuluessa. Koska energiatyyppejä on useita erilaisia, täytyy niiden hyödyntämisen hinnalle löytää jonkinlainen mittapuu. (Hall & Murphy, 2012, 223-251)

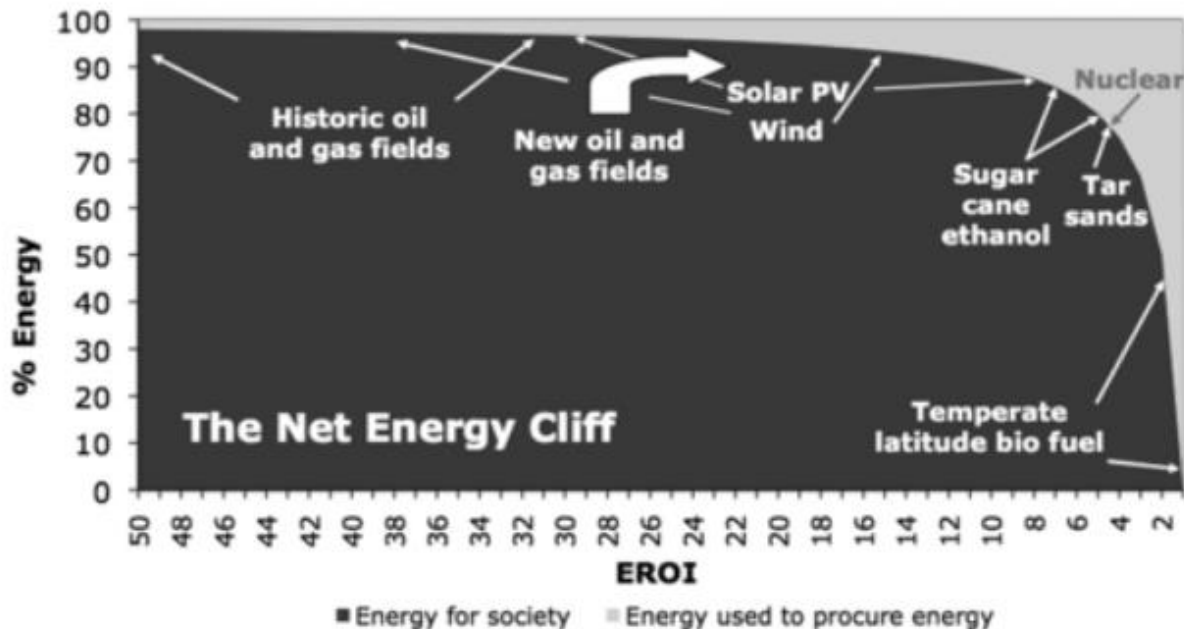
Yksi tällainen mittapuu eri energiatyyppien hyödyntämiselle on termi EROI (Energy Return On Investment). EROI kuvaa sitä, kuinka paljon energiaa on saatu tuotettua suhteessa energiamäärään,

joka on kulutettu energian tuottamiseen kyseisestä energianlähteestä. Mikäli esimerkiksi jokin tuotantoprosessi, kuten öljyntuotanto, kuluttaa joulen verran energiaa, mutta tuottaa 30 joulea per kulutettu energiayksikkö, on EROI-suhdeluku 30:1. EROI-suhdeluku on historiallisesti ollut laskeva, eli energiantuotannossa on siirrytty yhä vähemmän nettoenergiaa tuottaviin tuotantomenetelmiin (Hall & Murphy, 2012, 310). Mainittavaa on, että EROI oletettavasti vaihtelee esimerkiksi eri energianlähteiden sisällä. Eri ydinreaktorityypit saattavat esimerkiksi vaihdella kokonsa ja siten energiavaateidensa puolesta ja sama pätee esimerkiksi öljylähteisiin riippuen siitä, sijaitseeko öljy syvällä meressä vai lähes merenpinnan tasolla. Mainittu EROI-suhdeluvun laskeva trendi saattaa siis myös johtua siitä, että korkeammat hinnat, tai poliittiset ratkaisut ovat kannustaneet hyödyntämään vähemmän nettoenergiaa tuottavia energianlähteitä, kuten aurinko-, tai tuulivoimaa, eikä välttämättä viittaa siihen, että halpojen energianlähteiden saatavuus olisi nykyhetkellä uhattuna. Energiatyypit voidaan siis jakaa fossiilisiin polttoaineisiin, muihin uusiutumattomiin polttoaineisiin (uraani) ja uusiutuviin luonnonvaroihin (vesi-, ja tuulivoima, maalämpö) aurinkoenergiaan (aurinkopaneelit), sekä biomassaan (etanoli, puutuotteet) (Hall & Murphy, 2012, 313).

Kuviossa 1 esitellään Hallin & Murphyn (2010, 109) estimaatit eri energianlähteiden EROI-suhteille. Pystyakseli kuvaa kumulatiivista energiantuotantoa eri energianlähteistä. Vaaka-akseli kuvaa kunkin energiantuotantotavan EROI-lukua, eli arviota siitä kuinka paljon enemmän tuotantotapa tuottaa energiaa, kuin sen tuottamiseen kulutetaan energiaa. Huomionarvoista on, että estimaattien mukaan esimerkiksi biopolttoaineiden tuotanto vie lähes yhtä paljon energiaa kuin siitä saadaan. Vain energian muoto siis muuttuu (esimerkiksi ydinenergiasta polttoaineeksi). Sen sijaan öljyn ja kaasun EROI-suhteet ovat suuria, eli niiden tuotantoon kuluu vähän energiaa suhteessa siihen, mitä ne tuottavat.



Kuvio 1. EROI-suhteet eri energianlähteille Yhdysvalloissa. Tumma alue kertoo estimoidun yhteiskunnalle jäävän nettoenergian tuotantoprosessin jälkeen, vaalea alue estimoidun tuotantoon tarvittavan energiamäärän suhteessa saatuun energiamäärään. Nuolet kertovat, mihin kukin energianlähde arviolta sijoittuu. Vaaka-akselilla EROI-suhdeluku (Hall & Murphy, 2010, 109)



Cleveland et. al. (2000, 303-304) mukaan on myös tärkeää erottaa energiatyypit toisistaan. Voidaan esimerkiksi sanoa, että tonni hiiltä tai öljyä tuottaa enemmän energiaa kuin esimerkiksi merkittävä määrä aurinkopaneeleita. Kun tähän yhdistää sen, että aurinkoenergian tuottaminen pääomakustannuksineen on kalliimpaa kuin esimerkiksi hiilivoiman, voidaan erehtyä sanomaan, että hiilivoimalla tuotettu energia on kaikin tavoin parempaa kuin aurinkovoimalla tuotettu energia. Tärkeämpää kuitenkin on, miten energiaa käytetään. Esimerkiksi hiilen korkealla energiapitoisuudella ei ole merkitystä, mikäli sitä ei käytetä tehokkaasti, ja fossiilisten polttoaineiden käytöllä on useita negatiivisia ulkoisvaikutuksia.

Eri energiatyyppejä käytetään myös eri tarkoituksiin. Mikäli kaikki energiatyypit olisivat toisilleen täydellisiä substituutteja, energiatyypin energiapitoisuus ja sitä hyödyntävän pääoman hyötysuhde määritteli energianlähteen hinnan, joten kaikkien hinnat liikkuisivat suhteessa toisiinsa ainoastaan energiapitoisuuksiensa perusteella. Kuitenkin tosielämässä on huomattavissa, että eri energiatyyppien hinnat vaihtelevat niiden käyttötarkoitusten mukaan ja esimerkiksi sen mukaan,

kuinka paljon pääomaa niiden hyödyntäminen vaatii (Cleveland et. al., 2010, 303-304). Esimerkiksi uraani on halpaa suhteessa sen sisältämään energiamäärään, mutta uraanissa olevan energiamäärän hyödyntäminen vaatii runsaasti pääomaa ydinvoimalan muodossa.

## 2.2 Energian asema perinteisissä makrotalouden kasvumalleissa

Yksi tunnetuimpia makrotalousmalleja lienee Solowin (1956) kasvumalli. Solowin kasvumallissa pitkän ajan talouskasvu perustuu teknologiselle kehitykselle, sekä työvoiman- ja pääoman määrille. Solow (1956, 66-68) esittelee talouskasvun mallinsa seuraavasti:

Pääoman muutos  $dK$  riippuu säästämisestä  $sY$ , missä  $s$ =säästämisaste,  $Y$ =bruttokansantuote

$$dK = sY \quad (1)$$

Bruttokansantuote  $Y$  muodostuu pääoman  $K$ , työvoiman  $L$  sekä eksogeenisen teknologiamuuttujan  $A(t)$  myötä

$$Y = A(t)F(K, L) \quad (2)$$

Mallissa ei siis eritellä energian tai raaka-aineiden osuutta tuotannossa. Vaikka energia ja raaka-aineet voidaan ajatella osaksi pääomaa tai teknologista kehitystä, niiden sisällyttäminen pääoman ja teknologisen kehityksen muuttujiin kertoo, ettei Solowin mallissa energialla ja raaka-aineilla ole ainakaan yhtä merkittävää osaa kuin esimerkiksi työvoimalla.

Hiljattain kehitetyt endogeenisen kasvun mallit, kuten AK-mallit esittävät pääoman ja tuotannon suhteen muodossa  $Y = AK$ , missä A on vakio ja K on muuttuja, joka kuvaa pääoman ja informaation (henkisen pääoman) yhteisvaikutusta talouskasvuun. Säästöt ohjataan joko fyysiseen tai henkiseen pääomaan. Muutokset säästämisasteessa vaikuttavat talouden kasvuvauhtiin yli ajan. Säästämisasteen kasvu lisää talouden kasvuvauhtia pitkällä aikavälillä, kun taas säästämisasteen lasku heikentää talouskasvua pitkällä aikavälillä. (Stern, 2010, 5-6)

Schumpeterilaisissa kasvumalleissa taloudellinen kilpailu ei ole täydellistä ja firmat pyrkivät investoimaan jatkuvasti saavuttaakseen monopolivoittoja. Innovaatiot tapahtuvat sattumanvaraisesti (stokastisesti) investointien seurauksina ja niillä on positiivisia ulkoisvaikutuksia. Innovaatioiden vaikutukset kasautuvat, eli vanhat innovaatiot hyödyttävät tulevaisuuden innovaatioiden keksimisessä. Uudet innovaatiot tekevät vanhojen tuotteiden tuottamiseen suunnatusta pääomasta kuitenkin ajan mittaan arvotonta. Yritysten on siis jatkuvasti innovoitava pysyäkseen kehityksen tahdissa. Pitkän ajan kasvuvauhtiin vaikuttavat positiivisesti kasaantuneen pääoman määrä sekä innovaatioiden taso. Mikäli innovoinnin skaalatuotot pienenevät innovoinnin kustannusten kasvaessa, voi talouskasvu heikentyä tai jopa pysähtyä. (Stern, 2010, 6)

Stern (2010) on koonnut kirjallisuuskatsauksen, jossa hän käy läpi ja kommentoi energian ja BKT:n suhdetta käsitteleviä tutkimuksia. Hän on samaa mieltä useiden muiden energian ja talouskasvun yhteyden tutkimusten kirjoittajien kanssa, joiden mukaan nykyaikaiset makromallit eivät ota riittävästi huomioon energian vaikutusta talouteen ja talouskasvuun. Esimerkiksi Solowin kasvumalli ei hänen mukaansa selitä tarkasti, mistä teknologinen kehitys syntyy, joten teknologiamuuttuja on mallissa eksogeeninen. Myös energian roolia tuotannossa aliarvioidaan jättämällä se pois mallista tai sisällyttämällä se eksogeeniseen teknologia-termiin (Stern, 2010, 5-6).

Myös muut kuin taloudelliset seikat voivat vaikuttaa energiatehokkuuden hyödyntämiseen ja sitä kautta mahdollisesti energiantuotannon ja bruttokansantuotteen suhteen heikkenemiseen. Viitaten Gillingham et alii., (2009); Linaresiin & Labandeiraan (2010); Wei et. alii., (2009) Stern (2010, 27) huomauttaa, että markkinaongelmat ja behavioraaliset tekijät voivat jarruttaa energiainnovaatioita. Markkinaongelmista vaikuttavia tekijöitä voivat olla esimerkiksi epätäydellinen informaatio kuluttajien keskuudessa, ympäristöä koskevat ulkoisvaikutukset,

rahoituksen puute ja maanomistusongelmat, sekä lobbaus. Matisoffiin (2008) viitaten Stern (2010, 27) lisäksi toteaa, että tärkein tekijä energiansäästöinnovaatioiden leviämisessä esimerkiksi Yhdysvalloissa ovat ideologiset tekijät.

Energia, tai sitä hyödyntävä pääoma voidaan myös nähdä ns. General Purpose –Teknologioina (GPT). Esimerkiksi Breshananin & Trajtenbergin (1995, 83-86) mukaan Solowin mallin jäännöstermi, eli se osa, jota pääoman-, ja työvoiman määrät eivät selitä, on mahdollisesti jäljitettävissä tiettyihin teknologioihin, kuten puolijohteisiin ja sähkömoottoriin, jotka päinvastoin kuin Solowin mallin teknologiatermi, ovat endogeenisia. Myöskään Ayresin & Warrin (2010, 17) mukaan Solowin kasvumalli ei onnistu kvantitatiivisesti selittämään, mistä talouskasvu aiheutuu, eikä sitä, miksi jotkut taloudet kasvavat ja toiset eivät. On myös selvittämättä, miksi toiset taloudet kasvavat nopeammin kuin toiset. General Purpose Technology –hypoteesin mukaan teknologinen kasvu ei siis ole eksogeenista, vaan endogeenista, joskin vaikeasti mitattavaa. Vaikeasti mitattavuus johtuu esimerkiksi siitä, että esimerkiksi sähkömoottorin keksiminen vaikutti yhteiskuntaan useammalla tavalla, kuin vain moottorien hyötysuhteen kasvun myötä. Lisäksi esimerkiksi artikkelissa GPT:na pidetty puolijohde ei olisi mahdollinen ilman toista GPT:aa, sähköä. Näin GPT:t linkittyvät, eli ovat endogeenisia. GPT-teknologiat tarjoavat kansantaloudelle siis ns. kerrannaisvaikutuksen, jossa yhden sektorin innovaatio, esimerkiksi puolijohde, johtaa koko talouden tuottavuuden parantumiseen, esimerkiksi tietokoneiden kautta. (Breshanan & Trajtenberg, 1995, 84-88)

Energian ja bruttokansantuotteen suhteeseen vaikuttaa mahdollisesti myös talouden rakennemuutos siirryttäessä esimerkiksi agraaritaloudesta teolliseen talouteen ja teollisesta taloudesta palvelutalouteen. Agraaritalouden voidaan olettaa olevan vähemmän energiaintensiivinen kuin teollisen talouden ja palvelutalous voi olla useista seikoista riippuen joko vähemmän tai enemmän energiaintensiivinen kuin teollinen talous (Stern, 2010, 33). Costanzaan (1980) viitaten Stern (2010, 33) toteaa, että rakenteellisen muutoksen pienentävät vaikutukset energiankulutukseen saattavat olla liioiteltuja. Kun epäsuorat energiatarpeet otetaan huomioon, palvelutaloudenkin on erittäin energiaintensiivinen. Palvelu itsessään saattaa olla aineeton, mutta kiinteistöt, infrastruktuuri, liikenne, ja varastot, joita palvelun tuottamiseen ja käyttämiseen vaaditaan, vievät paljon energiaa ja vaativat jatkuvaa huoltoa.

Ayresin & Warrin (2010, 21-24) mukaan 1800-luvulla Euroopassa oli merkittävää huolta luonnonvarojen, kuten metsien ehtymisestä ja niiden talouden toimintaa heikentävästä vaikutuksesta. Metsien ehtyminen ja siitä johtuva pula puuhiilestä oli yksi syy, miksi kivihiilen käyttö aloitettiin Iso-Britanniassa. Myös hiilikaivosten ehtymisestä huolestuttiin 1800-luvun Iso-Britanniassa. Uusien tuotantomenetelmien ja maailmankaupan kehittymisen myötä myötä raaka-aineiden-, ja energian käytön kasvu alettiin kuitenkin nähdä kasvun seurauksena, eikä sen syynä tai mahdollistajana.

Ayres & Warr (2010, 151) esittävät myös, ettei energia sellaisenaan sovi Solowin mallin oletuksiin. Perinteisissä makromalleissa kaikki talouden palkat ohjautuvat tuotannontekijöille, joko työntekijöiden palkkojen tai pääoman vuokrien (rents) muodossa. Maksut raaka-aineiden omistusoikeuksien haltijoille eivät kuitenkaan ole maksuja ”energialle”, vaan esimerkiksi öljykentän omistajalle. Myös esimerkiksi auringonvalo on tuotannontekijä maataloudessa, mutta auringonvaloa ei voi omistaa tai myydä sähköksi muutetun aurinkoenergian lisäksi. Sama pätee myös tuuleen ja virtaavaan veteen, jotka ovat myös energianlähteitä. Olettaen, että energia on tuotannontekijä, sitä ei voida esimerkiksi tuulen tai auringonvalon muodossa sisällyttää maksuihin pääomalle tai työvoimalle. Kuitenkin sillä on merkittävä osa talouden toiminnassa.

Ongelmaa on käsitelty mainitusti määrittelemällä esimerkiksi auringonvalon mahdollistamat maataloustuotteet taloudellisesti niistä saatujen maksujen perusteella ja määrittelemällä resurssien, kuten kaivosten, omistajat raaka-aineista saatujen maksujen saajiksi (rents). Voidaan kuitenkin esittää, että luonnonvarat (natural capital) ovat erotettavissa muusta pääomasta (capital) sillä perusteella, että niiden hyödyntäminen vaatii yleensä sekä työvoimaa, että pääomaa. Luonnonvaroja ei kuitenkaan voida käsitellä säästöjen tai investointien muodossa. Esimerkiksi uusia malmioita ja öljylähteitä ei synny sen perusteella, mikä talouden säästöaste on. Pääoma ja työvoima ovat mahdollistaneet esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden hyödyntämisen, mutta eivät ole luoneet itse hyödynnettäviä luonnonvaroja. (Ayres & Warr, 2010, 150)

## 2.3 Energian asema ympäristötaloustieteen malleissa

Energian erikseen huomioon ottavissa malleissa tapauksessa tärkeä ero yllä mainittuihin malleihin on, että pääoman ja työvoiman oletetaan tarvitsevan merkittävät määrät energiaa pystyäkseen toimimaan, esimerkiksi lämpöenergian tai ravinnon muodossa. Tällöin korkeampi tuotannon taso vaatii todennäköisesti yhä enemmän energiaa ja sitä kautta yhä enemmän pääomaa tukemaan tuotannon ylläpitoa. Uusiutumattoman energian tapauksessa vallitsee todennäköisesti laskeva rajatuottavuus, sillä nykyisten malmioiden ja -fossiilisten polttoaineiden lähteiden ehtyessä on siirryttävä yhä marginaalisempiin tuotantomahdollisuuksiin, mikä johtaa kustannusten kasvuun (Constanza & Daly, 1992). Stern (2010, 6-7) mainitsee myös, että eri energialähteiden substituointi voi olla kallista tai mahdotonta. Teknologinen kehitys voi vaikuttaa joko positiivisesti tai negatiivisesti luonnonvarojen hyödyntämisen vauhtiin. Esimerkiksi polttomoottoriautoista siirtyminen sähköautoiluun vaatii nykyisen autokannan (pääomakannan) korvaamista autoilla, joihin sopii akku. Autojen polttoaineenkulutus ja sitä kautta energiankulutus voi siis laskea teknologisen kehityksen myötä, kun taas itse autojen keksiminen on oletettavasti kasvattanut energiankulutusta polttomoottorin polttoaineenkulutuksen myötä. Viitaten Hall et. al. (1986) Stern (2010, 9) toteaaakin, että suurin osa historiassa tapahtuneesta talouskasvusta on jollakin tapaa vaatinut kasvanutta energian käyttöä.

Ekologisen taloustieteen piirissä biofyysiset mallit pyrkivät selittämään koko talouden toimintaa energiavirroilla. Tällaisten mallien mukaan energia ohjataan joko pääomaan tai työvoimaan. Pääasiallisia energianlähteitä malleissa ovat aurinko ja fossiiliset polttoaineet. Pääomaa ja työvoimaa käsitellään pääoman kulutuksena ja työvoiman hyödyntämisenä sen sijaan, että ne itsessään vaikuttaisivat positiivisesti talouskasvuun. Työvoima ja pääoma ovat mallissa ikään kuin moottoreita, joilla energiavirtaa muutetaan energiasta exergiaksi (käyttöenergiaksi). Exergia käsitteenä tarkoittaa hyötysuhdetta, jolla voidaan tarkoittaa esimerkiksi polttomoottorin hyötysuhdetta. Hintojen tulisi siten biofyysisten mallien mukaan kuvastaa sitä energiamäärää, joka niiden valmistamiseen on käytetty. (Stern, 2010, 9)

Myös Stiglitz (1974) tarkastelee talouskasvua rajallisten luonnonvarojen maailmassa. Hänen mukaansa rajallisten luonnonvarojen olemassaolo tarkoittaa sitä, että Solowin mallista tuttuja ”steady-staten” ja ”luonnollisen kasvu-uran” käsitteitä tulee tarkastella uudelleen. Mikäli

esimerkiksi työvoiman määrä kasvaa eksponentiaalisesti, mutta käytettävissä olevien luonnonvarojen/energian määrä ei, kuinka kasvu-urat muuttuvat? Rajallisten luonnonvarojen tapauksessa luonnonvarojen hyödyntämiseen on käytettävä pääomaa ja mikäli talouskasvu vaatii yhä enemmän luonnonvaroja, ohjautuu yhä suurempi osa talouden resursseista ylläpitämään luonnonvarojen tuotantoa. Kasvu-urat, joihin liittyy luonnonvarojen mittavaa hyödyntämistä kärsivät jatkuvasti matalammasta pitkän ajan kasvusta. (Stiglitz, 1974, 123-124)

Rajallinen luonnonvarojen määrä ei kuitenkaan tarkoita, että talouskasvu lopulta muuttuu negatiiviseksi luonnonvarojen niukkuuden takia. Stiglitzin (1974, 131) mukaan luonnonvarojen ehtymistä voidaan kompensoida pääoman määrää kasvattamalla ja teknologian kehittymisellä. Molempia kompensoivia tekijöitä ei tarvita, vaan pelkkä pääoma tai teknologinen kehitys riittää kompensoimaan ehtyviä luonnonvaroja. Millä tahansa positiivisella teknologisella kehityksellä on helposti löydettävissä ainakin teoreettisia kasvu-uria, joissa kokonaistuotanto ei laske ehtyvistä luonnonvaroista huolimatta (Stiglitz 1974, 131).

Ayres & Warr (2003) tarkastelevat käyttöenergian (exergian) roolia talouskasvussa. He tarkastelevat energian merkitystä taloudessa uusklassisen kasvuteorian, tai Solowin kasvumallin, pohjalta. He viittaavat Georgescu & Roegenin (1975) työhön mainitessaan, ettei heidän mukaansa talouskasvua voi mallintaa huomioimatta energiaa ja materiaaleja tuotannontekijöinä. Artikkelin tavoitteena on endogenisoida Solowin mallissa ilmaantuva teknologisen kehityksen skaalatekijä A selittämällä sitä energiantuotannolla ja energian käytön tehokkuudella. He huomauttavat viitaten mm. Kaufmanniin (1992), että yksinkertaisesti energiantuotannon lisääminen tuotannontekijäksi Solowin kasvumalliin ei selitä talouskasvua pitkällä aikavälillä. (Ayres & Warr, 2003, 181-183)

Lisäksi Ayresin & Warrin, (2010, 134-135) mukaan ympäristötaloustieteilijät tekevät usein eron talouskasvun ja kestävä talouskasvun välillä. kestävä talouskasvuna pidetään sellaista kasvua, joka ei tapahdu ympäristön kustannuksella tai perustu uusiutumattomien luonnonvarojen kohtuuttomaan käyttöön. Heidän mukaansa uusiutumattomien luonnonvarojen tuotantoa, tai niiden myymisestä saatavia tuloja, ei tulisi ensisijaisesti merkata tulonlähteiksi, vaan pitää pääoman kulumiseen verrattavana toimintana.

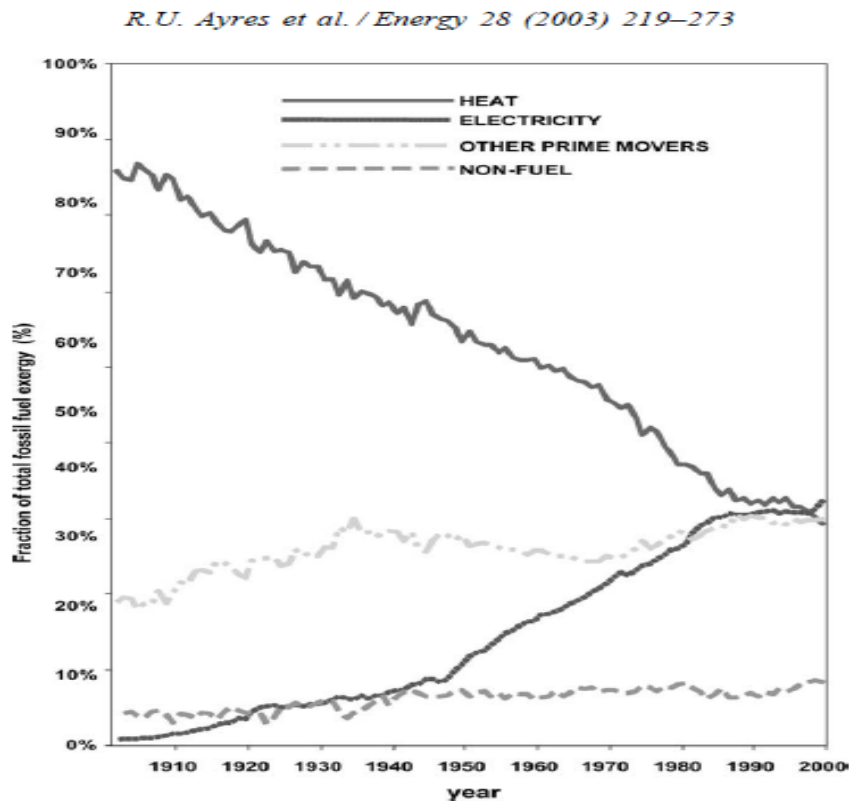
Sen sijaan, että Ayres & Warr (2003) käyttäisivät energiantuotantoa tuotannontekijänä, he käyttävät tuotannontekijänä fyysisen työn määrää (exergy services) selittämään talouden kasvua.

Tutkimuksessa Ayres & Warr (2003) keskittyvät sähköenergian mittaamiseen, koska heidän mukaansa siitä on olemassa parhaat tilastot. Esimerkiksi lämpöenergian kulutuksesta (kuten polttoöljyn käytöstä) ei ole olemassa kattavia tilastoja pitkältä aikaväliltä. (Ayres & Warr, 184)

Kuviossa 2 esitellään fossiilisten polttoaineiden käyttöosuudet kokonaisenergiankulutuksesta Yhdysvalloissa vuosien 1900-1998 välisenä aikana, sekä niiden hyötysuhteiden kehitykset samalla aikavälillä. Kuviossa 2 polttoainetta vaatimaton työ (Non-fuel) määritellään eläinten tekemäksi työksi, jonka hyötysuhde on neljä prosenttia. Toinen kategoria on mekaanisten koneiden käyttämät polttoaineet (other prime movers), joihin kuuluvat esimerkiksi energiaa liikkeeksi muuntavat polttomoottorit, polttoainetoimiset sähkögeneraattorit ja turbiinit. Sähköenergian (electricity) tapauksessa tarkastellaan fossiilisia polttoaineita sähköksi muuttavien pääomatuotteiden osuutta fossiilisten polttoaineiden kulutuksesta. Lämpöenergiaksi määritellään lämpö sellaisenaan, eikä esimerkiksi välillisesti sähkön tuotannon välineenä. Esimerkkinä lämpöenergian käytöstä ovat kotitalouksien lämmönkäyttö esimerkiksi ruoanlaittoon ja teollisessa toiminnassa teräksen sulattaminen ja kiinteistöjen lämmittäminen. Hyötysuhdeluvut on saatu insinöörialan tutkimuksista. Sähkön osuutta kokonaisenergiantuotantoa mitataan tuotettuina kilowattitunteina. Kuviosta huomataan, että sähköenergian osuus on kasvanut huomattavasti ajanjakson aikana lämpöenergian kustannuksella. (Ayres & Warr, 2003, 187-189)



Kuvio 2. Fossiilisten polttoaineiden exergiamäärien jakautuminen lämpö-, ja sähköenergian tuotannon välillä Yhdysvalloissa. Pystyakselilla exergiatyyppin osuus prosentteina, vaakakselilla vuodet. (Ayres & Warr, 2003, 230)



Fossil fuel consumption; exergy allocation among types of work, USA 1900–1998.

Kuviossa 3 on estimoitu taloudessa hyödynnetyn exergian määrä ja sen historiallinen suhde bruttokansantuotteeseen. Estimointi on tehty hyödyntämällä aineistoa kokonaisenergiankulutuksesta energiatyypeittäin ja kertomalla arvot eri energiatyypejä hyödyntävien voimalaitosten hyötysuhteiden kehityksellä. Kuten kuviosta näkyy, vaikka exergian hyödyntäminen on kasvanut Yhdysvalloissa viime vuosisadan aikana, 1970-luvun alun jälkeen exergian ja bruttokansantuotteen kehityksen suhde on ollut laskemaan päin, oletettavasti johtuen energiaa hyödyntävien pääomatuotteiden, kuten moottoreiden, hyötysuhteen kasvusta. (Ayres & Warr, 242-243)

Kuvio 3. Estimoitu mekaanisen työn määrä ja sen osuus bruttokansantuotteesta Yhdysvalloissa. Vasemmalla pystyakselilla exergian tuotannon määrä (eksajoulea), oikealla pystyakselilla exergian ja BKT:n suhde. (Ayres & Warr, 2003, 243)

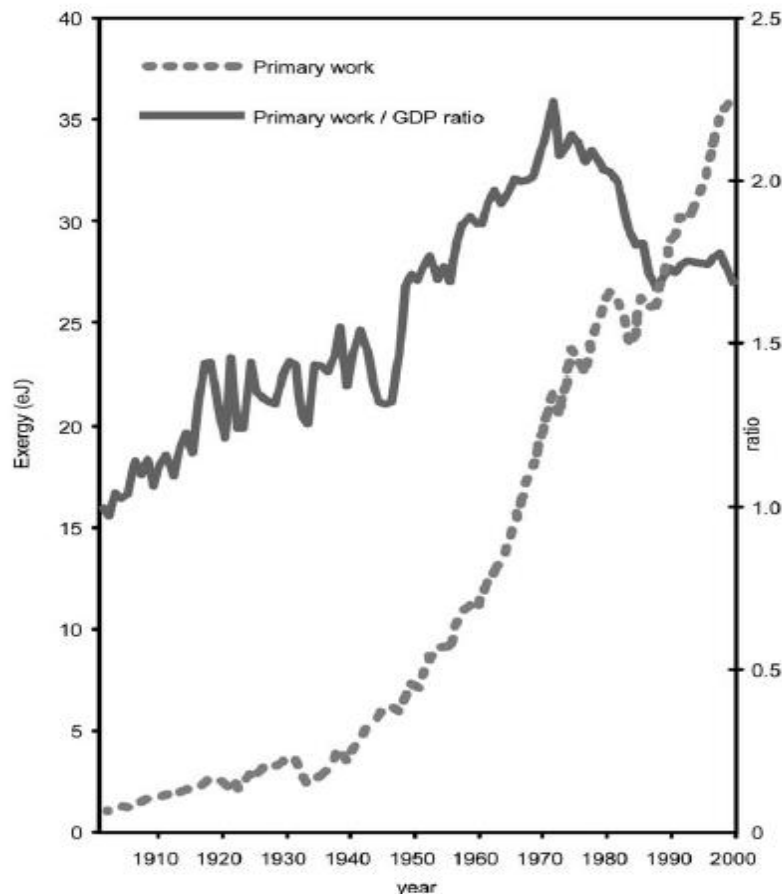


Fig. 17. Primary work and the primary work/GDP ratio, USA 1900–1998.

Ayres & Warr (2003, 194) huomauttavat, että teknologiamuuttujan korvaaminen kokonaisenergiakäytöllä  $U_e$ :lla:  $U_e = f_e E$ , missä  $f_e$  = hyötysuhde,  $E$  = energian kokonaistuotanto, aiheuttaa sen, ettei teknologinen kehitys ole enää itsenäinen pääomasta ja työvoimasta, sillä energian hyödyntäminen vaatii pääomaa ja pääoman-, sekä energian tuottaminen työvoimaa. Tällöin esimerkiksi Solowin mallissa vakioisten skaalatuottojen olettamuksesta pitkän aikavälin aikana joudutaan luopumaan, jolloin joudutaan käyttämään ns. fitting-metodeja parhaan tuloksen löytämiseksi. Esiteltävän mallin perusteet on alun perin esitetty Kümmel et. al (1985) tutkimuksessa. Hänen mukaansa, mikäli jonkin mallin (esimerkiksi Solowin kasvumallin) jotkin reunaehdot, kuten tuotannontekijöiden itsenäisyys toisistaan eivät päde, voidaan käyttää toisenlaista

menettelyä. Tällöin pyritään valitsemaan alkuperäistä Solowin mallia läheisin oleva mallimuoto, joka onnistuu korjaamaan tuotannontekijöiden itsenäisyyden paikkansapitämättömyyttä Solowin kasvumallissa energiamuuttujan kanssa. Mallia lähdetään rakentamaan Solowin mallista energiamuuttujalla  $E$  ja sen meno-osuutta kuvaavalla eksponentilla  $\gamma$ :

$$Y = A(t)L^{\alpha}K^{\beta}E^{\gamma} \quad (3)$$

missä  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ . Talouden kasvuvauhti saadaan ottamalla kokonaisderivaatta yhtälöstä (3) muuttujien suhteen:

$$\frac{dY}{dt} = Y \left( \frac{\alpha}{K} \frac{\partial K}{\partial t} + \frac{\beta}{L} \frac{\partial L}{\partial t} + \frac{\gamma}{E} \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial t} \right) \quad (4)$$

jossa viimeinen termi kuvaa Solowin residuaalia, eli sitä kasvun osaa, jota muut muuttujat eivät pysty selittämään. Tuotannontekijät eivät siis ole itsenäisiä toistensa suhteen, kun energiamuuttuja lisätään Solowin malliin. Pääoman ja työvoiman meno-osuuksia pyritään nyt siis selittämään seuraavasti olettaen, että tuotannontekijät eivät ole toisistaan riippumattomia. Meno-osuudet muutetaan tämän vuoksi eksogeenisista vakioista endogeenisiksi muuttujiksi, jotka riippuvat pääomasta, työvoimasta, exergiasta, sekä substituotavuutta kuvaavista skaalatermeistä.

$$\alpha = c \left( \frac{L + E}{K} \right) \quad (5)$$

missä  $c$  on vakioinen kerroin, joka saa arvoja välillä  $[0,1]$ . Yhtälöllä pyritään nyt kuvaamaan sitä, että työvoimaa  $L$  voidaan substituoida energialla  $E$  olettaen, että taloudessa on edes jonkin verran energiaa hyödyntävää pääomaa  $K$ . Skaalakerroin  $c$  määrää substituotavuuden rajat.

$$\beta = c \left( b \left( \frac{L}{E} \right) - \frac{L}{K} \right) \quad (6)$$

missä  $b, c$  vakoisia skaalakertoimia, jotka saavat arvoja välillä  $[0,1]$ . Yhtälö (6) kuvaa työvoiman jatkuvaa substituuutiota pääomalla  $K$  ja exergialla  $E$  sitä mukaa, kun talouden pääomaintensiivisyys kasvaa. Kun  $E$  ja  $K$  kasvavat, työvoimaan osuus tuotannosta pienenee. Koska mallissa skaalatuotot ovat vakioisia, niin energiamuuttujan meno-osuuskertoimien erotuksena:

$$\gamma = 1 - \alpha - \beta \quad (7)$$

Mallissa siis  $E$ = hyödynnetyn exergian määrä taloudessa,  $L$ =työvoimamuuttuja,  $K$ =kasautunut pääoma.  $A$  on eksogeeninen teknologian skaalakerroin. Mikäli talouskasvua voidaan selittää energiamuuttujalla  $E$ , pääomalla  $K$  ja työvoimalla  $L$ , tulisi muuttujan  $A$  olla ajasta riippumaton. Ayres & Warr (2003, 195) osoittavat myös, että malli täyttää vakioisten skaalatuottojen Euler-ehdot, sekä sen, etteivät marginaalituotokset ole negatiivisia. Euler-ehtojen mukaan esimerkiksi skaalatuottojen tulee olla vakioiset ja lineaariset (homogeeninen ensimmäistä astetta). Tämä tarkoittaa, että jos pääoman ja työvoiman määrä tuplataan, talouden kokonaistuotanto myös tuplaantuu (Ayres & Warr, 2003, 184-190).

Yhdistämällä meno-osuuksia kuvaavat yhtälöt (5)-(7) kasvuvauhtia kuvaavaan yhtälöön (4) ja ottamalla osittaisintegraali energiamuuttujan suhteen saadaan (8):

$$Y = AE \exp \left[ a(t) \left( 2 - \left( \frac{L + E}{K} \right) \right) + c(t) b(t) \left( \frac{L}{E} - 1 \right) \right] \quad (8)$$

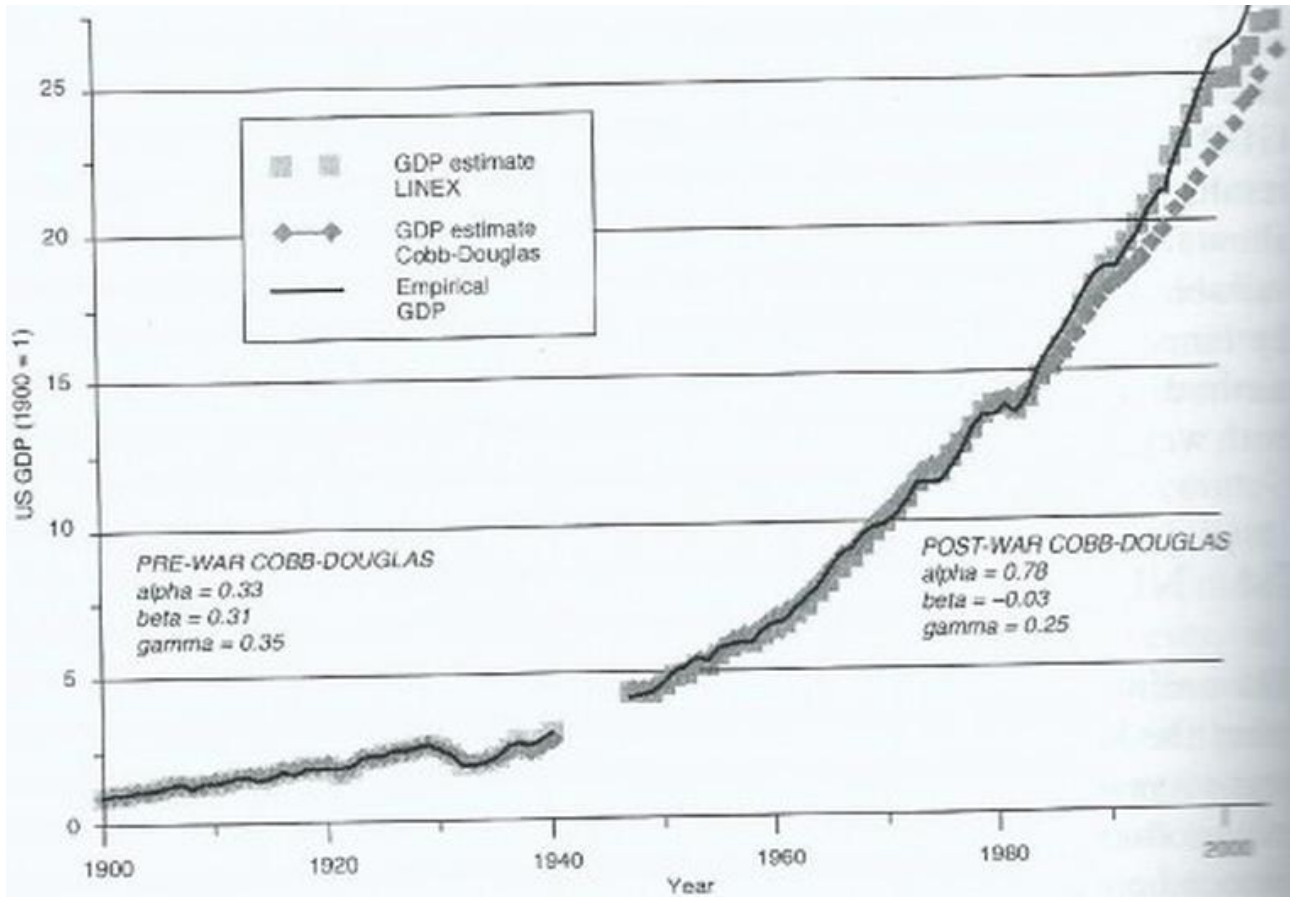
missä ajasta riippuvaiset termit  $c(t)$  ja  $b(t)$  voidaan kuvata pääoman tehokkuutena, sekä exergian kysyntänä. (Ayres & Warr, 2003, 190-191)

Malli siis käytännössä selittää bruttokansantuotetta teknologisella skaalamuuttujalla  $A$ , exergian määrällä  $E$ , sekä kahdella vakioisella, ajasta riippuvalla kertoimella  $c(t)$ , sekä  $b(t)$ . Kun verrataan mallia Japanin ja Yhdysvaltojen talouksiin huomataan, että teknologiatermi  $A$  voidaan asettaa

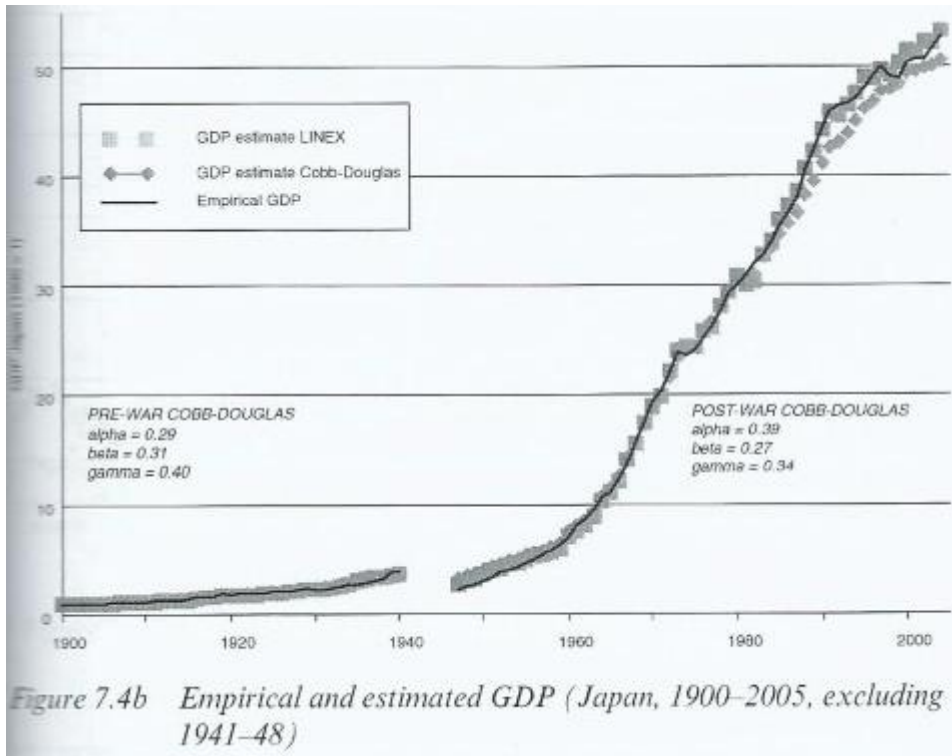
yhdeksi, eli malli selittää bruttokansantuotetta ainoastaan exergiamuuttujalla ja sen eksponenttifunktiolla. Malli onnistuu selittämään täydellisesti bruttokansantuotetta Yhdysvalloissa ja Japanissa vuoteen 1995 asti, jolloin mallin arvot alkavat eriytyä havaituista arvoista. Mallin residuaalit ovat stationaariset, eikä mallissa ole autokorrelaatiota tai heteroskedastisuutta. (Ayres & Warr, 2003, 205-211)

Mallintamisen tulokset voidaan nähdä kuvioissa 4-5 Japanin ja Yhdysvaltain osalta, joista huomataan, että malli onnistuu selittämään tapahtunutta talouskasvua pelkän energiamuuttujan ja kahden skaalamuuttujan avulla vuoteen 1975 lähes täysin, mutta vuoden 1975 jälkeen mallin selittämätön osa (jäännöstermi) on kasvanut 12 prosenttiin BKT:sta. Mallin mukaan ennen vuotta 1975 teknologinen kehitys (termi A solowin mallissa) on siis käytännössä täysin ollut selitettävissä energiantuotannon hyötysuhteen paranemisena. Kirjoittajat esittävätkin, että vuoden 1973 öljykriisi johti energiansäästötoimiin ja energiaa käyttävien toimintojen optimointiin. Öljykriisi olisi mallissa siis eräänlainen rakenteellinen muutos. Malli jättää toisen maailmansodan vuodet pois tarkastelusta, sillä sotatoimet luultavasti kasvattavat energiankulutusta väliaikaisesti ja BKT:n taso saattaa sotatoimien vuoksi vaihdella merkittävästi. (Ayres & Warr, 2003, 197-198)

Kuvio 4. LINEX-mallin (8), perinteisen Cobb-Douglas-mallin, sekä havaitun BKT:n kehitys Yhdysvalloissa vuosien 1900-2000 välisenä aikana. Aikasarja jaettu toista maailmansotaa edeltävään ja seuraavaan osaan. Pystyakselilla indeksoitu BKT (vuosi 1900=1), vaaka-akselilla vuodet (Ayres & Warr, 2003, 2006)



Kuvio 5. LINEX-mallin (8), perinteisen Cobb-Douglas-mallin, sekä havaitun BKT:n kehitys Japanissa vuosien 1900-2000 välisenä aikana. Aikasarja jaettu toista maailmansotaa edeltävään ja seuraavaan osaan. Pystyakselilla indeksoitu BKT (vuosi 1900=1), vaaka-akselilla vuodet (Ayres & Warr, 2003, 207)



Löydökset voidaan tiivistää siten, että vaikka varsinaisella energiantuotannolla ei voida selittää talouskasvua, ottamalla huomioon käyttöenergian määrän (exergy services) saadaan talouskasvua selitettyä huomattavasti paremmin. Exergy services määritellään siis muodossa kokonaisenergiantuotos\*hyötysuhde energiatyypeittäin paneeliaineistona, missä hyötysuhde saa arvoja välillä  $[0,1]$ . Kirjoittajat tuovat siis Solowin malliin hyötysuhteen (exergian) kasvun potentiaalisen vaikutuksen talouskasvuun ja esittävät hypoteesin, että tarkastelemalla pelkkää energiantuotantoa saadaan mahdollisesti harhaanjohtavaa dataa, sillä energiaa hyödyntävien laitteiden hyötysuhde on kasvanut ajan mittaan ja siten hukkaenergian määrä on vähentynyt suhteessa tuotettuun energiamäärään. Mallin selityssaste on kummassakin tapauksessa yli 99 prosenttia molempien aikasarjojen osalta. (Ayres & Warr, 2003, 198-211)

Mallin pääkritiikki voidaan kohdistaa vakoisten parametrien  $c(t)$  ja  $b(t)$  mallintamiseen pääasiallisesti sillä perusteella, kuinka hyvin ne sopivat historialliseen dataan. Vakiotermien aikaindeksi  $t$  viittaa tässä toista maailmansotaa edeltävään ja sitä seuraavaan aikasarjaan. Ongelma on termien muuttaminen eri ajanhetkillä eli ennen ja jälkeen toisen maailmansodan, vaikka vakiot pyrkivätkin mallintamaan tuotannontekijöiden substituoitavuutta, mikä saattaa vaihdella ajassa. Ayres & Warr (2003) eivät myöskään avaa tuloksissaan tarpeeksi mekanismeja, joilla kaikki talouskasvu selittyisi vuoteen 1975 pelkästään koneiden hyötysuhteen parantumisella. Olisi esimerkiksi outoa ajatella, ettei ajanjaksolla tapahtuvalla väestönkasvulla tai esimerkiksi innovaatioilla, kuten tietokoneilla, olisi ollut juuri mitään tekemistä talouskasvun kanssa.

Ayres & Warr (2003, 213-216) mainitsevat itsekkin, että kahden vapaan parametrin käyttö mallissa mahdollisesti heikentää saatuja tuloksia ja että vaikka mallissa ei ole havaittavaa heteroskedastisuutta tai autokorrelaatiota, se ei välttämättä ole ”oikea” korkeasta selityssasteesta huolimatta. He kuitenkin mainitsevat, että tulokset on saatu ilman eksogeenisen teknologiaterrinin sisällyttämistä malliin ja että parametrien arvot vaihtuvat vain toista maailmansotaa edeltävän ja jälkeisen aikasarjan kohdalla, eikä parametrien arvoja esimerkiksi vaihdella joka vuosi. Heidän mukaansa malli saavuttaa merkittävän selityssasteen pitkälle aikasarjalle käyttämällä hyvin vähän muuttujia tai parametreja. Kysymyksenä kuitenkin on, että mikäli energiamuuttujan meno-osuuskerroin  $\gamma$  on vain pääoman ja työvoiman meno-osuuskertoimien erotus, eikä sille anneta mitään endogeenista muotoa, termi saattaa itsessään muuttua tavallaan Solowin mallin teknologiamuuttujaksi, sillä mallissa kaikkea mitä ei pystytä selittämään työvoimalla tai pääomalla selitetään nyt energialla. Energiamuuttujasta tulee siis vain mahdollisesti Solowin mallin teknologiamuuttuja eri nimellä.



## 2.4 Energiamuuttuja Solowin kasvumallissa

Stern & Kander (2010) luovat Solowin kasvumallille perustuvan mallin kuvaamaan energian merkittävyyttä kansantaloudessa ja talouskasvussa. Kirjoittajien tarkoituksena on esittää, miksi energialla saattaa olla erittäin suuri merkitys talouskasvussa, vaikka energian meno-osa kansantaloudessa onkin pieni. Kuten Wrigley (1988), myös Stern & Kander (2010, 4-5) huomauttavat, esimerkiksi Iso-Britannian hiilivarannoilla oli luultavasti merkittävä vaikutus sille, että teollinen vallankumous sai alkunsa juuri Englannissa. Iso-Britannian halvat hiilivarannot yhdistettynä muita maita kalliimpiin työvoimakustannuksiin loi kannustimia ottaa käyttöön lämpövoimakoneita, joissa oli aluksi erittäin heikko hyötysuhde. Jatkuva innovointi kuitenkin paransi koneiden hyötysuhteita ja mahdollisti koneiden taloudellisen hyödyntämisen muuallakin kuin hiilikaivosten läheisyydessä.

Mallissaan Stern & Kander (2010, 5-8) lisäävät Solowin kasvumalliin energian kolmanneksi tuotannontekijäksi. Energian substituoitujoustopuolisuuden muiden tuotannontekijöiden suhteen oletetaan olevan pienempi kuin yksi, eli substituoinnissa on rajoitteita. Teknologinen kehitys jaetaan mallissa työn tuottavuutta lisääviin teknologioihin, sekä energiankäyttöä tehostaviin teknologioihin. Energiankäyttöä tehostavat teknologiat viittaavat teknologioihin, joilla yksikkö energiaa saadaan tuottamaan enemmän jotain taloudellista tuotosta ilman substitutiota pääoman tai työvoiman kanssa. Muuttuja sisältää siis esimerkiksi energiaa hyödyntävän koneen hyötysuhteen parantumisen tai uusia tuotteita, kuten tietokoneita, jotka käyttävät energiaa uusin, tuottavammin keinoin.

Ayres & Warr (2010, 31) antavat hyvän esimerkin energiaa hyödyntävien pääomatuotteiden hyötysuhteen kehittymisestä. Esimerkiksi turbiineilla sähköä tuottavien voimalaitosten sähköntuotannon hyötysuhde kehittyi aikavälillä 1900-1970 3,5 prosentista 35 prosenttiin. Myös LED-valot ovat esimerkki siitä, kuinka teknologinen kehitys kasvattaa energiatehokkuutta. Energiamuuttujan lisääminen malliin voidaan oikeuttaa sillä, että perinteinen Solowin kasvumalli, jossa on endogeenisina muuttujina työvoima ja pääoma, ei mainitusti onnistu selittämään tapahtunutta talouskasvua. Esimerkiksi vuosien 1909-1945 välisenä aikana Solowin kasvumallin jäännöstermi oli 90 prosenttia, eli 9/10 talouskasvusta johtui jostain muusta kuin työvoiman tai

pääoman määrän kasvusta. Tätä jäännöstermiä pienentämään otettiin malliin mukaan eksogeeninen teknologiamuuttuja. (Ayres & Warr, 2010, 5-6)

Teknologinen kehitys oletetaan mallissa yksinkertaistamisen vuoksi eksogeeniseksi. Eksogeenisuus sopii myös tutkimukseen esimerkiksi tutkimuksen case-maan Ruotsin tapauksessa, sillä maan voi olettaa olleen Iso-Britannian seuraajavaltio teollisen vallankumouksen tapauksessa, eli teknologinen kehitys on ainakin teoriassa voinut olla eksogeenista. Malli on vakioisten substituutiojoustojen CES (Constant Elasticity of Substitution) funktio. CES-funktiomuodon valintaan päädytään Cobb-Douglas –tuotantofunktion sijasta siksi, että tällöin voidaan käyttää yhden sektorin mallia useamman sektorin mallin sijaan. Termodynaamiset rajoitteet myös määrittävät, että tuotanto vaatii jonkin äärellisen energiamäärän tuotannontekijänä pääoman määrästä huolimatta. Myös tutkitussa Ruotsin tapauksessa energian meno-osuus BKT:sta on pudonnut 90 prosentista vuonna 1800 noin 10 prosenttiin vuonna 2010, mikä ei tue Cobb-Douglas –tuotantofunktion oletusta siitä, että tuotannontekijöiden kustannusosuudet ovat vakioita, mikäli energia sisällytetään malliin mukaan. (Stern & Kander, 2010, 6)

Malli koostuu kahdesta yhtälöstä:

$$Y = \left( \gamma_V^{\frac{1}{\rho}} (A_L^{\beta} L^{\beta} K^{1-\beta})^{\rho} + \gamma_E^{\frac{1}{\rho}} (A_E E)^{\rho} \right)^{\frac{1}{\rho}} \quad (9)$$

$$\Delta K = sY - \delta K \quad (10)$$

Missä:

$\gamma_E, \gamma_V$  = vakioita, joiden summa on yksi. Vakiotermit kuvaavat energian ja Solowin mallin tuotannontekijöiden (työvoima ja pääoma) osuuksia kokonaistuotannosta.

$A_L, A_E$  = Teknologian tasoa A kuvaavat indeksit työvoimalle (L) ja energialle (E).

L = työvoiman määrä

K = pääoman määrä

$\beta$  = CES-funktion mukaiset meno-osuudet

E = Tuotetun energian määrä

$\sigma$  = substituuiojousto energia-, ja pääoma-työvoima –aggregaattien välillä.

$\rho = (1-\sigma)/\sigma$

s = säästämisaste

$\delta$  = pääoman poistoaste

Yhtälö (9) on CES-funktio, joka yhdistää perinteisen Solowin mallin työvoiman (L) ja pääoman (K) yhdeksi osaksi taloutta ja lisää toiseksi osaksi energian (E). Työvoiman ja energian teknologiamuuttujat  $A_L, A_E$  oletetaan eksogeenisiksi. Yhtälö (10) kuvaa pääoman kasautumista, eli osa tuotannosta säästetään ja muutetaan pääomaksi, mistä vähennetään nykyisen pääoman poistot. Huomionarvoista on, että jos mallissa  $\rho \rightarrow 1$  ja  $\gamma_E \rightarrow 0$  malli muuttuu normaaliksi Solowin kasvumalliksi. (Stern & Kander, 2010, 9)

$$\lim_{A_E E \rightarrow \infty} \bar{K} = \left( \frac{s \gamma^{\frac{1}{\sigma \rho}}}{\delta} \right)^{\frac{1}{\beta}} A_L L \quad (11)$$

Pääoman rajatuottavuus saadaan derivoimalla (9) pääoman suhteen, jolloin saadaan yhtälö (12) (Stern & Kander, 2010,10):

$$\frac{\partial Y}{\partial K} = (1 - \beta) \gamma^{\frac{1}{\sigma}} \left( \frac{A_L L}{K} \right)^{\beta \rho} \left( \frac{Y}{K} \right)^{1-\rho} \quad (12)$$

Kun  $\partial K$  asetetaan nolaksi ja yhdistetään funktiot (9) ja (10), sekä asetetaan  $\beta$ :n arvoksi esimerkiksi 0.5, huomataan, että pääoman steady-state –konvergoituu yhtälön (11) mukaan. Pääoman rajatuottavuuden  $\frac{\partial Y}{\partial K}$  ensimmäinen derivaatta on positiivinen ja toinen derivaatta negatiivinen, joten positiivisen steady-staten läsnäollessa systeemi on stabiili. Steady-state on sama kuin Solowin mallissa, mutta osoittajassa on nyt lisänä termi  $\gamma^{\frac{1}{\sigma \rho}}$ . Kun  $\sigma \rightarrow 1$  ja  $\gamma \rightarrow 0$  yhtälö konvergoituu alkuperäisen Solowin mallin mukaiseen steady-stateen. Mikäli energian saatavuudesta on pulaa, tai substituoitavuus on kallista voi pääomakannan steady-state olla alhaisempi kuin Solowin mallissa. (Stern & Kander, 2010, 10)

Sternin & Kanderin (2010, 11) mukaan voidaan huomata, että vaikka pääomakannan steady-state –uralle ei ole olemassa yleistä ratkaisua, voidaan pääoman steady-state –funktion derivaattoja tarkastelemalla löytää, miten kukin muuttuja vaikuttaa pääomakannan steady-stateen. Mallissa BKT:n kasvu-uran säilyminen positiivisena on mahdollista, kunhan työvoiman tuottavuuden kasvu  $A_L$  on positiivista. Vakioisista skaalatuotoista johtuen työvoiman määrän kasvattaminen

kasvattamatta energian määrää johtaa BKT:n laskuun henkeä kohden. Teknologiatermien derivaatta steady-statessa olevan pääomakannan suhteen on homogeeninen astetta yksi. Mikäli teknologiamuuttujilla on sama kerroin, pääoman steady-state tulee kasvamaan ajan myötä. Mikäli energian määrä on vakio ja energian teknologiamuuttujan arvo on nolla, talous konvergoituu steady-stateen, jossa pääoma ja tuotanto ovat vakioita työvoiman tuottavuuden kasvusta huolimatta. (Stern & Kander, 2010, 13)

Mallissa steady-state pääomalle (capital stock) saadaan asettamalla  $\Delta K = 0$ :

$$\bar{K} = -\left(\frac{\delta}{s}\right)^\rho \bar{K}^\rho + \gamma_V^\sigma (A_L L)^{\beta\rho} \bar{K}^{\rho(1-\beta)} + \gamma_E^\sigma (A_E E)^\rho = 0 \quad (13)$$

Derivoimalla funktio (13) eri muuttujien suhteen saadaan selville, kuinka kukin muuttuja vaikuttaa pääoman steady-stateen. (Stern & Kander, 2010, 11). Derivaatat ovat tarkasteltavissa liitteessä 2.

Esimerkiksi kun lasketaan  $\frac{\partial \bar{K}}{\partial \gamma_E}$  voidaan huomata, että energiaparametrin  $\gamma_E$  etumerkki riippuu energiantuotantotermin E suuruudesta. Mikäli derivaatan osa  $A_L^\beta L^\beta K^{1-\beta} / (1 - \gamma_e)$  on suurempi kuin  $\frac{A_e E}{\gamma_e}$ , niin energian niukkuus vaikuttaa pääoman steady-stateen negatiivisesti. Kun energiasta E ei ole pulaa, kasvattaa energiaparametrin  $\gamma_E$  kasvu pääoman määrää steady-statessa. Laskemalla  $\frac{\partial \bar{K}}{\partial \beta}$  huomataan, että työvoiman tulo-osuuden määrä riippuu pääoman ja työvoiman suhdeluvusta. Kun työvoimaa L on saatavilla paljon suhteessa pääomaan K, kasvattaa työvoiman käytön lisääminen pääoman määrää steady-statessa. Tämän vaikutuksen aiheuttaa derivaatassa kerroin  $(\ln L - \ln \bar{K})$ . Pääoman steady-state kasvaa myös säästämisasteen kasvaessa. Tämä johtuu siitä, että derivaatan  $\partial \bar{K} / \partial s$  nimittäjä  $\delta - s \partial Y / \partial K$  on steady-state -tasapainossa positiivinen. Samasta syystä työvoiman L ja energiamuuttujan E vaikutus ja niiden teknologiatermien vaikutukset  $A_L, A_E$  vaikuttavat aina positiivisesti pääoman steady-stateen (Stern & Kander, 2011, 12). Intuitiivisesti kun energiaa ja työvoimaa pystytään hyödyntämään enemmän, tarvitaan niiden lisäksi myös enemmän pääomaa.

### 3. Energiankulutuksen ja BKT:n historiallinen suhde

#### 3.1 Malthusilainen talous ja energia

Wrigley (1988) kirjoittaa Malthusin ja klassisen taloustieteen suhteesta talouskasvuun. Hän toteaa, että kirjallisuudessa esimerkiksi taloustieteilijä Adam Smith nähdään usein teollistumisen ja uuden talouskasvun ajan perikuvana, kun taas Malthus nähdään esiteollisen, alhaisen tuottavuuden kasvun maailman kuvaajana. Wrigley (1988) lisää, että Smith nähdään usein rajattoman talouskasvun puolestapuhujana, vaikka hänen mukaansa Malthusin ja Smithin näkemyksissä oli useita yhtäläisyyksiä väestönkasvun, ympäristön ja resurssien suhteen. (Wrigley, 1988, 30)

Wrigley (1988) esittelee prosessia, joka siirsi Euroopan esiteollisesta ajasta teolliseen aikaan ja sen vaikutuksia bruttokansantuotteeseen. Hänen mukaansa sekä Malthus, että Adam Smith olivat 1700-luvulla erittäin skeptisiä talouskasvun jatkumisesta Englannissa, vaikka reaali-palkat olivat nousseet koko vuosisadan ajan. Syyksi Malthus ja Smith esittivät Malthusin mallille tyypillisen tekijän, eli väestönkasvun negatiivisen vaikutuksen reaali-palkkoihin. Kun elintaso kasvaisi tarpeeksi, perheet pystyisivät ylläpitämään suurempaa lapsilukua, joka taas laskisi reaali-palkkoja tasapainoon työvoiman lisäämisen myötä, jossa oltiin ennen luultua 1700-luvun ”väliaikaista” reaali-palkkojen kasvua. Tuottavuuden kasvukin oli Malthusin ja Smithin mielestä vain väliaikaista, sillä tuotokset olivat sidottuja maa-alaan, jonka määrä oli vakio. Mikäli maata ylihyödynnettäisiin, saataisiin siitä väliaikaisesti normaalia suurempaa tuottoa, mutta pitkällä aikavälillä maan tuottavuus heikentyisi esimerkiksi maaperän eroosion myötä. Maan rajatuottavuus oli siis laskeva. Kun parhaat maatilkut oli hyödynnetty, jäljelle jäävien maa-alueiden tuotanto oli heikompi. (Wrigley, 1988, 33-34)

Hansenin & Prescottin (2002, 1207-1208) tutkimus tukee Malthusilaista teoriaa esiteollisesta maailmasta. Kuviosta 6 voidaan huomata, että Malthusilaisen talouden piirre, maanvuokrien ja väestömäärän liikkuminen samaan suuntaan, rikkoutui teollisen vallankumouksen myötä.

Maanvuokrien ja väestömäärän suhde johtui siitä, että maan määrän ollessa vakio ja muiden tulonhankintamahdollisuuksien, kuin maanviljelyn ollessa vähäisiä maan omistajat voivat periä korkeampia vuokria viljelijöiltä. Aikasarjassa yllä mainitut suhteet alkavat rikkoontua aikasarjan loppupäässä, kun teollinen vallankumous sai alkunsa.

Kuvio 6. Maanvuokrien (rent) ja väestönkasvun (population) kehitys pystyakselilla aikavälillä 1275-1800 Englannissa. (Hansen & Prescott, 2002, 1208)

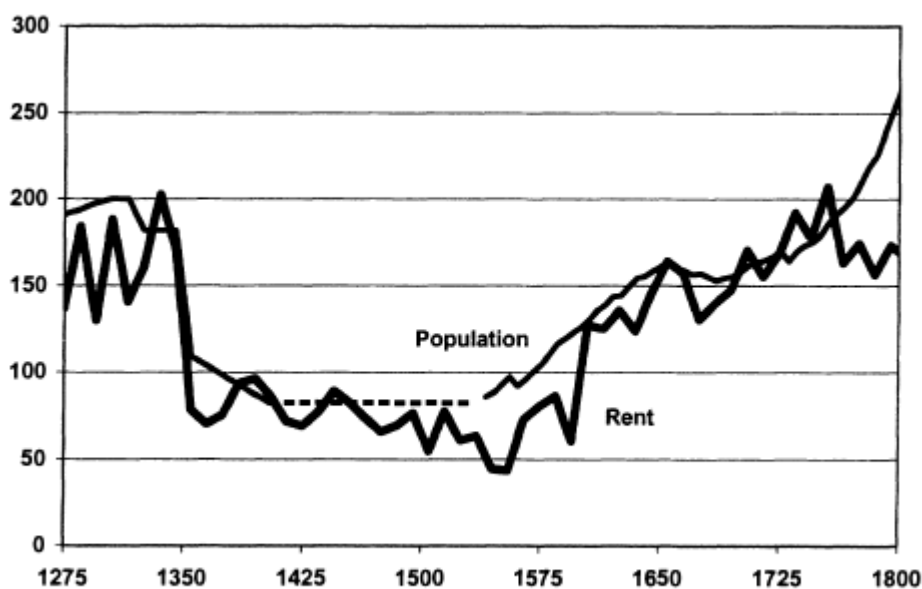


FIGURE 2. POPULATION AND REAL LAND RENT

Wrigleyn (1988, 34-35) mukaan uusien energiavarojen, kuten hiilen, hyödyntäminen auttoi taloutta siirtymään uuteen, vakaasti kasvavan tuottavuuden ja elintason maailmaan. Ennen hiilen hyödyntämistä energia saatiin biomassasta, kuten puusta, joka sitoi energiansaannin yllämainitun mallin mukaisesti maahan, jonka tuottavuus esimerkiksi puun suhteen oli pitkällä aikavälillä vakio. Hiilivarannot kuitenkin avasivat uuden energianlähteen, joka oli riippumaton vanhoista tuotannon rajoitteista ja mahdollisti siirtymisen teolliseen maailmaan. Tuotantorajoitteet vähenivät huomattavasti energiaintensiivisillä aloilla, kuten laivanrakennuksessa, metallin valmistuksessa ja kemikaaliteollisuudessa. Raaka-aineiden saatavuuden kasvu ja energian halpeneminen johtivat siten tuotantorajoitteiden vähenemiseen esimerkiksi asuntojen ja infrastruktuurin osalta (Wrigley, 1988, 41-42).

Wrigley (1988, 43-45) huomauttaa lisäksi, että ennen teollista aikaa ruoan tuottamiseen täytyi käyttää vähemmän energiaa kuin siitä saatiin. Toisin sanoen viljelysmaan täytyi tuottaa enemmän ruokaa, kuin kului niitä viljelevien työeläinten ja ihmisten ravintona, jotta saatiin ylijäämää. Teollisen ajan aikana tämä suhde muuttui ja 1900-luvun puoliväliin mennessä ruoan tuottamiseen

kului huomattavasti paljon enemmän energiaa kuin siitä saatiin. Tämän mahdollisti muiden energiamuotojen kuin lihasenergian hyödyntäminen maanviljelyssä, erityisesti polttomoottorin leviämisen myötä. Tällöin pystyttiin kumoamaan vallitseva oletus, jonka mukaan maankäytöllä olisi Malthusin mallin kaltainen laskeva rajatuottavuus. Huomauttamisen arvoista on myös, että elintason nousu, jonka Wrigley (1988, 45) määrittelee reaalisen BKT:n kasvuksi, eriytyi aiemmasta trendistään teollisen vallankumouksen myötä. Energialla esimerkiksi hiilivoiman (lämpöenergian) muodossa on siis mahdollisesti tärkeä linkki siihen, että teollinen vallankumous ja reaalisen bruttokansantuotteen kasvu olivat ylipäättään mahdollisia.

Hansenin & Prescottin (2002) tutkimus tukee Wrigleyn (1988) näkemyksiä. 1700-luvulta lähtien Englannin talous lakkasi toimimasta Malthusin mallin odotusten mukaan. Sekä väkiluku, että reaalipalkat alkoivat kasvaa. Maan merkitys tuotannolla siis mahdollisesti laski merkittävästi siirryttäessä esiteollisesta taloudesta teolliseen talouteen. Taulukko 1 viittaa vahvasti maan merkittävyyden vähenemiseen siirryttäessä teolliseen talouteen. Yhdysvalloissa maan arvon osuus bruttokansantuotteesta laski 88 prosentista 9 prosenttiin vuosien 1870-1990 välisenä aikana. Huomionarvoista on, että Yhdysvalloissa viljelysmaan osuus kansantuotteesta 1800-luvulla oli merkittävä siitä huolimatta, että maa oli luultavasti vielä suhteellisen harvaan asutettu, erityisesti Yhdysvaltain länsiosissa, minkä tulisi nimenomaan pitää maan hinnat matalana.

Taulukko 1. Viljeltävän maan arvon osuus BKT:sta Yhdysvalloissa, prosenttia. (Hansen & Prescott, 2002, 1209)

TABLE 2—U.S. FARMLAND VALUE RELATIVE TO GNP

Year	Percentage
1870	88
1900	78
1929	37
1950	20
1990	9

*Notes:* The 1870 value of land is obtained by taking 88 percent of the value of land plus farm buildings, not including residences. In 1900, the value of agriculture land was 88 percent of the value of farmland plus structures.

*Sources:* U.S. Bureau of the Census (1975). Farmland values for 1990 are provided by Ken Erickson (online: [erickson@mailbox.econ.ag.gov](mailto:erickson@mailbox.econ.ag.gov)).



### 3.2 Teollinen talous ja energia

Ayres & Warr (2012) tarkastelevat kriittisesti perinteisen talousteorian mukaista käsitystä energiantuotannon merkityksestä bruttokansantuotteen kehitykseen. He aloittavat todeten, että nykyiset makromallit, kuten Solowin malli, olettavat BKT per capita:n kasvun johtuvan teknologisesti kehityksestä ja pääomasta, mukaan lukien inhimillisestä pääomasta. Energiaa ja sen merkitystä ei eritellä yleisissä makromalleissa, vaikka energian saatavuus on mahdollinen talouskasvun heikentäjä tulevaisuudessa. Nykyiset mallit eivät myöskään selitä talouskasvun heikkenemistä muuten, kuin tehtyjen työtuntien laskuna, joka voi myös olla seurausta jostain muusta ilmiöstä, eikä talouskasvun heikentymisen syy. Kasvun rajoitteista he toteavat, että 2-2,5 prosentin BKT per capita:n kasvuvauhdilla 100 vuoden kuluttua ihmisten elintaso olisi noin 10 kertaa nykyistä korkeampi, luoden skaalaa menneen kasvun ylläpitämisen mahdollisista ongelmista tulevaisuudessa esimerkiksi ympäristön kohdalla. (Ayres & Warr, 2012, 1)

Energian saatavuuden mahdollisia esteitä tulevaisuudessa voivat olla maantieteellisistä seikoista johtuvat kaivosten ja öljyesiintymien ehtyminen ja malmin-, sekä fossiilisten polttoaineiden etsinnän nousevat kustannukset, kun kaivoksia ja öljyä etsitään yhä teknisesti vaikeammista olosuhteista, sekä mahdollisten uusien löytöjen pääomakustannusten nousu johtuen jälleen epäedullisista sijainneista ja teknisestä vaikeista projekteista, kuten syvänmeren öljyesiintymistä. Kasvavat kustannukset voivat mahdollisesti syrjäyttää investointeja muualla taloudessa, johtaen potentiaalisesti talouskasvun heikkenemiseen. Kirjoittajat kuitenkin huomauttavat, että tähän saakka raaka-aineiden reaali hinnat ovat alhaisemmat kuin 100 vuotta sitten, johtuen niiden hyödyntämiseen käytettävän teknologian kehityksestä. (Ayres & Warr, 2012, 4)

Ayresin & Warrin (2012, 5-6) mukaan bruttokansantuote esitetään perinteisesti talouden kokonaispalkkojen summana työvoiman palkkojen, sekä pääoman korkojen, osinkojen, vuokrien ja rojaltien muodossa. Talouden kustannusosuudet Yhdysvalloissa ovat perinteisesti olleet 30 prosenttia pääoman osalta ja 70 prosenttia työvoiman osalta jo kauan aikaa. Tulo-allokaatio (meno-osuus) -teoreema olettaa, että tuotannon jousto kullekin tuotannontekijälle, tässä tapauksessa pääomalle ja työvoimalle, täytyy olla suhteessa sen kustannusosuuteen kokonaistuotannosta. Energian meno-osuus on kuitenkin nykytaloudessa erittäin pieni, vaikka energialla on iso rooli tuotannontekijöiden, kuten pääomatuotteiden tekemisessä ja hyödyntämisessä. Energian rooli

kokonaistuotannossa on siis suurempi kuin sen meno-osuus tuotannontekijöiden kustannuksista. Energialla Ayres & Warr (2012, 6) tarkoittavat exergiaa, jonka osuus kokonaisenergiasta on energiaa hyödyntävän koneen tai eliön hyötysuhde.

Ayresin & Warrin (2012, 9-10) mielestä esimerkiksi öljyn hyödyntämisen äkillinen puolittuminen aiheuttaisi meno-osuuttaan paljon suuremman pudotuksen bruttokansantuotteeseen. Öljyn hintaosuus Yhdysvaltain bruttokansantuotteesta on neljä prosenttiyksikköä. Perinteisen talousteorian mukaan öljyn hyödyntämisen äkillinen puolittuminen johtaisi meno-osuuden mukaiseen, kahden prosenttiyksikön pudotukseen bruttokansantuotteessa. Ayres & Warr (2012, 10) esittävät, että kerrannaisvaikutuksineen öljytuotteiden tuotannon puolittuminen aiheuttaisi huomattavasti kahta prosenttiyksikköä suuremman pudotuksen bruttokansantuotteen tasoon, sillä vaikutukset näkyisivät kuljetusten ja yksityisautoilun häiriintymisenä, joka vaikuttaisi negatiivisesti yksityiseen kulutukseen.

Myös ei-energiatyypin palvelun tai talouden osan, kuten vesihuollon tai viemäröinnin osa talouden toiminnassa on oletettavasti merkittävästi suurempi kuin sen osa kokonaistalouden maksuista (rents). Kuitenkin vesihuollon pettäminen aiheuttaisi luultavasti osuuttaan huomattavasti suuremman negatiivisen vaikutuksen talouden toimintaan. Teollisessa taloudessa talouden sektorit ovat siis riippuvaisia toisistaan, eikä kaikkia tuotannontekijöitä, kuten vettä ja ruokaa työvoiman ylläpitämisessä, pystytä substituimaan. (Ayres & Warr, 2010, 155-156)

Sitä, vaikuttaisiko esimerkiksi tuotannon puolittuminen kokonaistalouteen enemmän meno-osuuden verran, voidaan tutkia esimerkiksi CGE-mallien (Computable General Equilibrium) pohjalta. CGE-mallit käyttävät empiiristä aineistoa estimoimaan erilaisten shokkien, esimerkiksi jonkin raaka-aineen hinnannousun, vaikutuksia kokonaistalouteen. CGE-mallien huonoja puolia ovat siinä käytettyjen parametrien, kuten joustojen, muuttuminen ajassa, sekä mittausvirheet empiirisessä aineistossa ja usein huono ennustuskky johtuen mallin parametrien monimutkaisuudesta, kuten talouden kokonaistasapainoa estimoidessa (Beckman et. al., 2011, 799-800).

Beckman et. al. (2011) pyrkivät estimoimaan öljyn hinnan muutosten vaikutusta talouskasvuun ja öljyn kysyntään käyttäen Burniaux & Trungin (2002) GTAP-E -mallia. GTAP (Global Trade

Analysis Project) on monimutkainen malli, joka pyrkii mallintamaan maailmantalouden kokonaistasapainoa. Malliin syötetään empiiriset arvot tarkasteltavilta alueilta ja pyritään historian perusteella ennustamaan seuraavan periodin arvoa tarkasteltavalle muuttujalle. Adams (2005, 944-947) esittelee GTAP-mallin oletuksia (liite 1). Mallissa Bruttokansantuote lasketaan Solowin mallista tutulla tavalla:

$$Y^{MP}(r) = C(r) + I(r) + G(r) + (X(r) - M(r)) \quad (14)$$

Missä  $Y$ =kokonaistuotanto,  $MP$ =markkinahinnat  $r$ =tarkasteltava alue,  $C$ =yksityinen kulutus,  $I$ =investoinnit,  $G$ =julkinen kulutus,  $X$ =vient,  $M$ =tuonti

ja tuotantofunktio lasketaan seuraavasti:

$$Y^{FC}(r) * A(r) = Fy(L(r), K(r)) \quad (15)$$

Missä  $Y^{FC}(r)$ = työvoiman ja pääoman meno-osuuksien (FC) perusteella muodostettu reaalinen BKT, joka ottaa huomioon tuotannontekijöiden tehokkuusparannukset,  $A(r)$ =teknologista muutosta kuvaava eksogeeninen muuttuja,  $L(r)$ =työvoima,  $K(r)$ =pääoma.

Koko mallin funktiot ovat luettavissa liitteestä 1. Mallissa vienti  $X$  riippuu negatiivisesti korkotasosta ja tuonti  $M$  vastaavasti positiivisesti korkotasosta, sekä eksogeenisestä muuttujasta  $Y_w(r)$ , joka kuvaa taloudellisen toiminnan tasoa kullakin maantieteellisellä alueella  $r$ . Tuotannontekijöille maksetaan meno-osuuksien mukaan ja työvoiman palkka, sekä pääoman vuokrat (rent) ovat oletetun täydellisen kilpailun maailmassa yhtä suuria kuin niiden rajatuotokset. Tuotantofunktiossa termin  $A(r)$  saadessa suurempia arvoja teknologinen kasvu vahvistuu ja päinvastoin. Adamsin (2005, 943) mukaan termin  $A(r)$  saadessa korkeampia arvoja taloudellinen kasvu heikentyisi, mutta tässä on ilmeisesti tapahtunut kirjoitusvirhe. Malli on siis hyvin samankaltainen Solowin kasvumallin oletusten kanssa muutamien muunnoksien, kuten esimerkiksi eksogeenisen parametrin  $Y_w(r)$  myötä. Investoinnit taloudessa ovat  $\frac{I(r)}{K(r)} = \vartheta(r)$ , missä  $\vartheta(r)$  on vakio, joka vaihtelee alueittain.

Tutkimuksessaan Beckman et. al. (2011) eivät onnistu mallintamaan öljyn hinta-, ja kysyntäshokkien vaikutusta kokonaistalouteen GTAP-mallin perusteella. Beckmanin et. al. (2011, 805) malli ei onnistu ennustamaan öljyn hinnan vaihtelua historiallisen datan perusteella. Syyksi tähän mainitaan muun muassa öljykartelli OPEC, joka pystyy vaikuttamaan öljyntuotantoon merkittävällä tavalla ja siten luomaan eksogeenisiä tarjontashokkeja. Malli olettaa myös öljyn kysynnän olevan erittäin joustavaa, mikä saattaa olla epärealistinen oletus.

Eräs argumentti on, että mikäli energian osuus taloudesta on suurempi kuin sen meno-osuus, energian käytön lisääminen johtaisi suoraan suurempaan bruttokansantuotteen tasoon. Samalla tavalla kuin energian käytön vähentämisellä on negatiivisia kerrannaisvaikutuksia, olisi energiankäytön lisäämisellä positiivisia kerrannaisvaikutuksia. Kuitenkin Ayres & Warr (2012,13) viittaavat esimerkiksi IEA:n (International Energy Agency) tutkimuksiin, joiden mukaan energiaa käytetään nykyisin enemmän kuin olisi optimaalista. Vasta-argumentiksi Ayres & Warr (2012, 13) toteavat, että nykyisen tutkimuksen valossa kuitenkin myös työvoimaa hyödynnetään enemmän kuin olisi optimaalista, mistä heidän mukaansa kertoo se, että työvoimamenot kasvavat huomattavasti hitaammin, kuin työvoimaa substituovien pääomatuotteiden menot. Toiseksi, energiankulutusta rajoittavat työvoiman määrä ja pääomakanta. Mikäli näin ei olisi, olisi energia täydellinen substituutti esimerkiksi koneille tai työvoimalle ja niitä voitaisiin korvata toisillaan ilman rajoitteita. Näin ei tietenkään voi olla, vaan energiantuotantoa ja -kulutusta rajoittavat yllä mainitut tekijät. Tällaiset fyysiset rajoitteet johtuvat siitä, että ei ole esimerkiksi mahdollista syöttää koneeseen enempää energiaa, kuin mitä kyseinen laite pystyy hyödyntämään. On olemassa myös ”pehmeitä” rajoitteita, kuten lakiin perustuvia, organisatorisia, sosiaalisia ja rahoitukseen liittyviä seikkoja, jotka mahdollisesti estävät tai rajoittavat substituointia energian, pääoman ja työvoiman välillä (Ayres & Warr, 2012, 14).

Cleveland et. al. (2000, 311-312) mainitsevat, että energian suhde reaaliseseen bruttokansantuotteeseen on laskenut jatkuvasti vuodesta 1950 useissa teollistuneissa maissa. Yksi mahdollinen selitys tälle on, että energian kulutuksen ja talouskasvun suhde on heikentynyt merkittävästi vuosien saatossa. Ympäristötaloustieteilijät taas ovat sitä mieltä, että suhde on pienentynyt pääasiassa energian laadun paranemisen myötä. Esimerkiksi sähköenergialla on suurempi hyötysuhde kuin lämpöenergialla, jolloin vaikka energiankulutus jollakin yksiköllä

(esimerkiksi BTU, British Thermal Unit) mitattuna onkin laskenut tai pysynyt ennallaan, saadaan samalla energiamäärällä paljon enemmän aikaiseksi hyötysuhteen kasvun myötä.

Cleveland et. al. (2000, 312) esittelevät oman mallinsa kuvastamaan energian laadun vaikutusta energia/BKT -suhteeseen:

$$\frac{E}{GDP} = \alpha + \beta_1 \ln\left(\frac{Naturalgas}{E}\right) + \beta_2 \ln\left(\frac{Oil}{E}\right) + \beta_3 \ln\left(\frac{PrimaryElectricity}{E}\right) + \beta_4 \left(\frac{PCE}{GDP}\right) + \beta_5 (Productmix) + \beta_6 \ln(Price) + \varepsilon \quad (16)$$

Missä  $\alpha$ =vakiotermi, E =energiankulutus mitattuna lämpöyksikköinä (British thermal unit, Btu), GDP=reaalinen BKT, Naturalgas=maakaasun kulutus (Btu), Oil=öljynkulutus (Btu), Primary Electricity= ydinvoiman, vesivoiman ja aurinkovoiman tuottama sähköenergia (Kwh muunnettu Btu-yksiköiksi), PCE=reaalinen kotitalouden tulojen meno-osuus energiaan, Product Mix=energiaintensiivisten alojen osuus koko taloudesta (esim. kemianteollisuus) ja Price=energian reaalihintaindeksi. Mallia testattiin Ranskan, Saksan, Iso-Britannian ja Japanin kohdalla. Kertoimien  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  ja  $\beta_3$  odotetaan olevan negatiiviset, sillä maakaasulla, öljyllä ja yllämainituilla sähköntuotannon menetelmillä on korkeampi hyötysuhde kuin hiilellä, joka on muuttujan E suurimpana tuotantomuotona energianlähde, johon muita verrataan. Maakaasun, öljyn ja esimerkiksi ydinvoiman tuotannon lisääminen siis odotettavasti laskee talouden energiantensiivisyyttä hyötysuhteen kasvun myötä. Malli ei myöskään välttämättä ole lineaarinen, eli esimerkiksi Primary Electricityn osuuden kasvu ei odotettavasti laske E/GDP –suhdetta lineaarisesti ainakaan silloin, kun hyötysuhde lähestyy fysikaalisia rajoitteita. (Cleveland et. al., 2000, 312)

Taulukko 2, yhtälön (16) OLS-regression kertoimet ja t-arvot sulkeissa. (Cleveland et. al., 2000, 315)

Table 5  
Regression results<sup>a</sup>

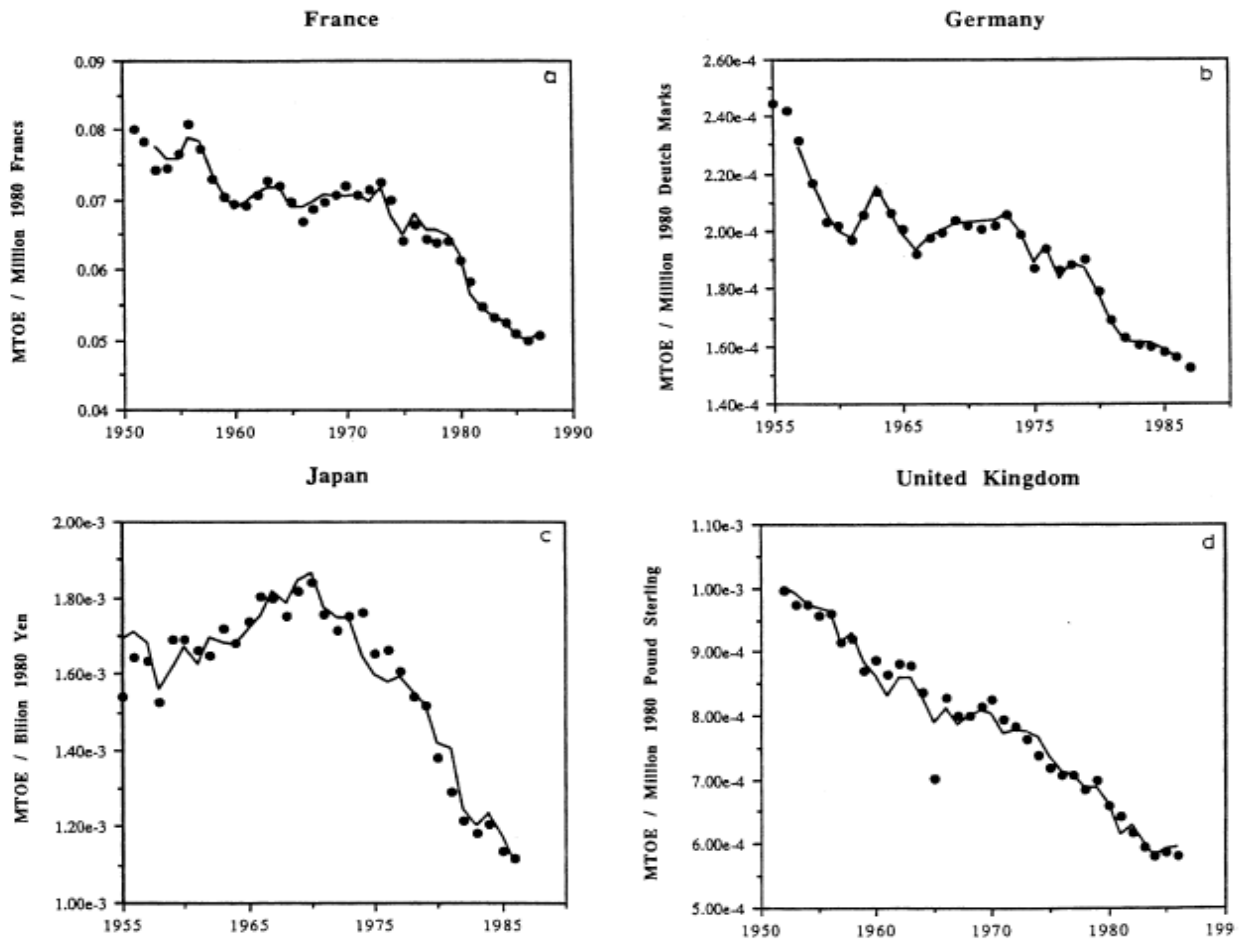
	Petroleum	Primary electricity	PCE on fuel	Fuel price <sup>b</sup>	Product mix <sup>c</sup>	R	$\rho$	Durbin-Watson	Estimation period
France	$-0.227 \times 10^{-1}$ (6.24)	$-0.802 \times 10^{-2}$ (4.79)	0.394 (2.89)	$-0.176 \times 10^{-1}$ (3.27)	0.153 (2.32)	0.98	0.29	1.95	1953–1987
Germany	$-0.298 \times 10^{-4}$ (12.2)	$-0.167 \times 10^{-4}$ (8.22)	$0.421 \times 10^{-2}$ (14.73)	$-0.132 \times 10^{-7}$ (4.59)	$-0.359 \times 10^{-3}$ (6.61)	0.991		2.12	1957–1986
Japan	$-0.235 \times 10^{-3}$ (2.83)	$-0.302 \times 10^{-3}$ (4.28)	$0.0423 \times 10^{-1}$ (3.30)	$-0.320 \times 10^{-3}$ (5.83)	$0.253 \times 10^{-4}$ (3.11)	0.953	0.47	2.26	1955–1986
UK	$-0.883 \times 10^{-3}$ (2.54)	$-0.705 \times 10^{-4}$ (3.88)	$0.124 \times 10^{-1}$ (4.67)		$0.159 \times 10^{-2}$ (9.09)	0.968		1.82	1952–1986

<sup>a</sup> t, Statistic in parentheses.

<sup>b</sup> Fuel price, France (0–1); Germany (1–2); Japan (–2). Running average in parentheses.

<sup>c</sup> Product mix, France (manufacturing); Germany (services); Japan (chemical, petroleum products, and basic metals); UK (manufacturing).

Kuvio 7, mallin (16) ennustetut arvot (yhtenäinen viiva) ja havaitut arvot (pallot). Cleveland et. al., 2000, 314)



Kuviosta 7 ja taulukosta 2 nähdään, että tilastollisesti malli onnistuu selittämään erittäin hyvin energiankulutus/BKT –suhdetta testattujen maiden tapauksessa kyseisellä aikavälillä ilman keinotekoisien parametrien lisäystä malliin. Malli saavuttaa myös erittäin korkean selitysasteen ilman tilastollisesti havaittavaa autokorrelaatiota (DW-testisuure noin 2). Verrattaessa havaittujen arvoja ennustettuihin arvoihin huomataan, että ainoastaan Iso-Britannian tapauksessa kuviossa on havaittujen arvojen joukossa yksi ns. outlier-havainto, joka on merkittävästi ennustettujen arvojen ulkopuolella. Myös arvojen regressiokertoimien etumerkit ovat kuten odotettu (Cleveland et. al., 2000, 313-315). Mallin heteroskedastisuuden testaamisesta ei kuitenkaan ole mainintaa ja kysymysmerkki on myös, että mikäli mallin muuttujat eivät käyttäydy lineaarisesti muuttujien arvojen muuttuessa, eivät OLS-regression oletukset päde.

Malli kuitenkin luo tukea väitteelle, että vaikka viime vuosikymmenten kokonaisenergiakulutus kokonaisuudessaan on laskenut, laskun syynä voi lähes kokonaisuudessaan olla siirtyminen energiatehokkaampiin energianlähteisiin, eli hiilen osuuden lasku kokonaisenergiantuotannosta. Cleveland et. al., (2000, 313) ovat sitä mieltä, että E/BKT-suhteen lasku on Iso-Britanniassa, Ranskassa ja Yhdysvalloissa seurausta siirtymästä hiilen käytöstä polttoaineisiin ja edelleen polttoaineista sähköenergian käyttöön (Primary electricity). Eli vaikka energian kokonaiskäyttö bruttokansantuotteen yksikköä kohden on laskenut, se voi johtua lähes yksinomaan exergian, eli käyttöenergian määrän kasvusta. Kun vähemmän tehokkaiden energialähteiden, kuten hiilen käyttö vähenee edelleen, vaikenee E/BKT –suhteen alentaminen entisestään. Energian merkitys teollisessa taloudessa ei siis ole välttämättä muuttunut viimeisten vuosikymmenien aikana, vaan sen tuotanto ja hyödyntäminen ovat tehostuneet.

## 4. Energia tuotannontekijänä ja energiatyyppien substituointi

### 4.1 Pääoma energian substituuttina

Koetse et. al. (2007) suorittavat meta-analyysin tutkimuksille, joissa tarkastellaan pääoman ja energian substituoitavuutta. Substituutiota pääoman ja energian välillä voi esimerkiksi olla uusi kone, joka käyttää vähemmän energiaa, kuin aiemmin käytössä ollut laite. Tutkimukset, joissa on tähän mennessä tarkasteltu energian hintojen muutosten suhdetta pääomakannan muutoksiin, eivät ole löytäneet yksiselitteistä suhdetta. Koetse et. al. (2007) hyödyntämä meta-analyysi pyrkii löytämään yhdenmukaisia trendejä tai tuloksia pääoman ja energian välisestä substituutiojousta. Meta-analyysin kirjoittajat määrittelevät siten, että kun joukkoa itsenäisiä tutkimuksia kerätään kokonaisuudeksi ja niistä testataan jotain hypoteesia, voidaan saavuttaa merkittävää parannusta tulosten tilastollisessa ja kvalitatiivisessa merkitsevyydessä verrattuna yksittäisiin tutkimuksiin. (Koetse et. al., 2007, 2337)

Kirjoittajat mainitsevat, että tuotantofunktion estimoinnissa ongelmana on, että tuotannontekijämuuttujat ovat endogeenisiä. Tämä ongelma voidaan kiertää käyttämällä selittävinä muuttujina tuotannontekijöiden meno-osuuksia, joiden summa on yksi. Malli on lineaarinen, ja mallissa  $i, j \in \{K, L, E\}$ :

$$S_i = B_i + \sum_j \beta_{ij} \ln \left( \frac{p_j}{p_m} \right) + \beta_{iy} \ln y + \beta_{it} t \quad (17)$$

Missä  $S_i$ = kustannukset minimoiva osuus tuotannontekijälle  $i$ ,  $p$ = tuotannontekijöiden hinnat,  $y$ = kokonaistuotanto ja  $t$ = aikaindeksi. Mallista estimoidaan tuotannontekijöiden osuutta kuvaava parametri  $\beta_i$ , Slutskyn substituutioparametri  $\beta_{ij}$ , skaalatuottoparametri  $\beta_{iy}$  ja teknologista muutosta kuvaava parametri  $\beta_{it}$ . Slutskyn substituutioparametri tarkoittaa, että substituutio voidaan jakaa substituutiovaikutukseen ja tulovaikutukseen, eli esimerkiksi tuotannontekijän hinnan laskiessa kalliimman tuotannontekijän hyödyntäminen vähenee halvemman tuotannontekijän kustannuksella



(substituutiovaikutus). Toisen tuotannontekijän halpeneminen kuitenkin lisää käytettävissä olevia varoja, jolloin tulovaikutuksen myötä molempia hyödynnetään alkuperäistä tilannetta enemmän. Mallissa Slutskyn parametrien tulee kuitenkin olla symmetriset, eli  $\beta_{ij} = \beta_{ji}$ . (Koetse et. al., 2008, 228)

Tutkimuksessa analysoidaan pääoman ja energian substituotavuutta tuotannontekijöiden hintojen ristijouston kautta, eli tarkastellaan sitä, kuinka paljon pääoman määrä muuttuu prosentuaalisesti, kun energian hinta muuttuu yhden prosentin. (CPE, Cross Price Elasticity):

$$CPE_{KE} = \frac{\hat{B}_{KE} + s_K s_E}{s_K} \quad (18)$$

Missä:

$CPE_{KE}$  = prosentuaalinen muutos pääomalle, kun energian hinnat nousevat prosentin.

$s_K, s_E$  = pääoman ja energian meno-osuudet kokonaistuotannon meno-osuuksista.

Malli on kuitenkin rajoitettu, sillä se sallii vain yhden tuotannontekijäparin tutkiskelun ja hukkaa siten muiden tuotannontekijöiden mahdolliset vaikutukset pääoman ja energian substituointiin. Kirjoittajat lisäävät siksi tutkimukseen Morishiman substituutiojouston, joka esitetään seuraavasti (MES, Morishima Elasticity of Substitution):

$$MES_{KE} = CPE_{KE} - PE_E \quad (19)$$

Missä:

$PE_E$  = energian hintajousto,  $\frac{\delta \ln E}{\delta \ln Price(E)}$

$CPE_{KE}$  = Kahden tuotannontekijän hintojen ristijousto, tässä  $\delta \ln K / \delta \ln P_e$

MES mittaa tuotantofunktion isokvanttien kaarevuutta ja siten teknologisen substituution helppoutta verrattuna CPE:en, joka mittaa taloudellista substituuutiota. MES ei voi olla negatiivinen, sillä se merkitsisi substituuutiota pääomasta energiaan siitä huolimatta, että energian suhteellinen hinta kasvaisi. (Koetse et. al., 2008, 2238-2239)

Koetse et. al. (2008) ottavat mukaan tutkimukseen kaikki eri tieteellisten tutkimusten tietokannoista löytyvät artikkelit, jotka käsittelevät pääoman ja energian substituuutiota kehittyneissä talouksissa. Alkuperäisen tutkimuksen täytyy perustua joko Morishima-hintasubstituutioon tai hintojen ristijousto. Löydetyistä tutkimuksista jätetään pois myös sellaiset tutkimukset, joissa käsiteltiin käyttöpääomaa (working capital) osana pääomakantaa. Tämä tehdään siksi, että voitaisiin testata substituoitavuutta ainoastaan koneiden ja energian välillä. Käyttöpääomaan luetaan mukaan esimerkiksi kassavarat, joten käyttöpääoman tutkimukseen mukaan ottaminen voisi vääristää tuloksia. Mikäli substituuutiojoustomuuttujan keskivirhettä ei tutkimuksen perusteella voida laskea, jätetään tutkimus pois analyysistä. Lopulta päädyttiin 317 CPE-estimaattiin ja 314 MES-estimaattiin 34 eri tutkimuksesta. Kaikki käsitellyt tutkimukset käsittelevät joustoja logaritmimuodossa. (Koetse et. al., 2008, 2239)

Meta-analyysiin mukaan otettujen tutkimusten tulokset ovat kirjoittajien mukaan heterogeenisiä, eikä niistä voi siis löytää yksittäistä trendiä tai vetää johtopäätelmiä kumpaankaan suuntaan. Tämä saattaa johtua aineiston kirjavuudesta. Jotkut tutkimukset käyttävät jonkun tietyn teollisuudenalan aineistoa, joka jättää huomioimatta sen, että substituuutiojousto voi vaihdella merkittävästi alakohtaisesti. Aineistossa on myös mahdollisesti mittausvirheitä, sillä esimerkiksi energia saattaa sisältää joko sähköenergian tai sähkö-, sekä lämpöenergian käytön riippuen tutkimuksesta. Vaikka tutkimus keskittyy kehittyneisiin maihin, voi maiden välillä ilmetä heterogeenisyyttä maantieteellisen sijainnin ja tutkimusten eri ajankohtien välillä. Aineistossa onkin havaittavissa selkeitä eroja esimerkiksi Eurooppaa ja Pohjois-Amerikkaa koskevien tutkimusten välillä. Laajasta aineistosta syntyy myös tyypillisesti suuria joustokertoimia, sillä laajaan aineistoon sisältyy mainitusti yrityksiä useilta eri aloilta, lisäten estimaattien heterogeenisyyttä. (Koetse et. al., 2008, 2242-2244)

Tulosten mukaan erityisesti polttoaineita hyödyntävät laitteet ovat alttiita substituutiolle ja polttoaineiden hintojen nousu tai hintojen vaihtelut ajavat yrityksiä substituomaan kyseisiä laitteita energiatehokkaammiksi. Euroopassa substituutio vaikuttaa tulosten perusteella olevan vähäisempää kuin Pohjois-Amerikassa. Tämä saattaa kirjoittajien mukaan johtua siitä, että Euroopassa pääoma on jo merkittävästi energiatehokkaampaa kuin Pohjois-Amerikassa, jolloin substituution mahdollisuuden heikkenevät. Kirjoittajien mukaan aikasarjadata kuvaa lyhyen aikavälin muutoksia substituutiojoustossa ja poikkileikkausaineisto pitkän aikavälin muutoksia substituutiojoustossa. Tämä johtuu siitä, että mainitusti isomman aineiston käyttäminen (poikkileikkausaineisto) johtaa mahdollisesti substituutiojouston yliarvioimiseen, sillä siinä käytettävä aineisto on heterogeenisempaa huolimatta siitä, että poikkiaineistodata on kerätty saman toimialan yrityksistä. (Koetse et. al., 2008, 2245)

Taulukossa 3 esitellään Mixed Effects –estimaatit hintojen ristijoustoille ja Morishima-estimaateille Hedgesin & Olkin (1985) mukaan. Mixed Effects –malli on estimoitu ottamaan huomioon heterogeenisuuden vaikutukset muuttujien varianssissa ja ottamaan huomioon se, että todelliset joustoestimaatit saattavat vaihdella suuresti eri tutkimusten välillä. Meta-analyysissä jokaista tutkimusta painotetaan samalla arvolla. Tällöin tutkimukset, joissa on paljon estimaatteja, eivät saa liian suurta painoarvoa verrattuna muihin, suppeampaa aineistoa hyödyntäviin tutkimuksiin. (Koetse et. al., 2008, 2244)

Mixed Effects –malli eroaa normaalista lineaarisesta regressiosta siten, että se sallii eri havainnoille eri vakiotermit (intercepts). Esimerkiksi pääoman ja energian substituomisen helppous saattaa vaihdella huomattavasti eri teollisuudenaloilla. Tästä syystä malli pitää esimerkiksi Taulukon 3 selittävät muuttujat ennallaan, mutta estimoi mallin erikseen esimerkiksi eri teollisuudenaloilla johtuen niiden heterogeenisuudesta (Stram & Lee, 1994, 1171).

Matemaattisessa muodossa Mixed Effects –malli voidaan esittää seuraavasti:

$$y_i = \beta X_i + \gamma Z_{ci} + \varepsilon_i \quad (20)$$

Missä  $y_i$  = selitettävä muuttuja, tässä tapauksessa hintojen ristijousto tai Morishima-jousto. Muuttuja  $X_i$  kuvaa Fixed Effectejä, eli tässä tapauksessa havaittuja substituuutiokertoimia. Termi  $Z_{ci}$  taas kuvaa Mixed Effectejä  $i$  havainnolle  $c$  kategoriassa, eli tässä tapauksessa esimerkiksi eri teollisuudenaloille. Regressiokertoimet on siis estimoitu erikseen jokaiselle kategorialle.  $\beta$  on havaittu kovarianssimatriisi Fixed Effecteille, eli koko aineistolle, kun taas  $\gamma$  on havaittu kovarianssimatriisi Mixed Effecteille, eli kullekin kategorialle.  $\beta$  ja  $\gamma$  ovat siis mallin regressiokertoimia. Termi  $\varepsilon_i$  on mallin virhetermi. (Stram & Lee, 1994, 1171-1173).

Taulukon 3 tuloksista huomataan, että erityisesti vakiotermien tapauksessa tulokset ovat tilastollisesti merkitseviä ja ovat erimerkkisiä. Raaka-aineiden lisääminen malliin ei aiheuta tilastollisesti merkitsevää vaikutusta. Tämän tuloksen pohjalta vaikuttaisi, että pääoma ja energia vaikuttavat olevan itsenäisiä muuttujia suhteessa raaka-aineisiin. Eksogeenisen teknologiamuuttujan lisääminen malliin ei myöskään aiheuta tilastollisesti merkitsevää vaikutusta. Ei-vakioisten skaalatuottojen oletaminen muuttaa tuloksia tilastollisesti merkitsevästi. Tässä tapauksessa, mikäli vakioiset skaalatuotot eivät tosielämässä päde, on mahdollista, että pääoman ja energian substituoitavuus aliarvioidaan (Koetse et. al., 2008, 2244).

Energianlähteistä polttoaineiden joustokertoimet hintojen ristijouston tapauksessa vaikuttavat olevan suurimmat ja erittäin tilastollisesti merkitsevät. Morishima-jousten tapauksessa jousten suunnat ovat samat, mutta muuttujat tilastollisesti merkitsemättömiä. Mikäli joustokerroin on harhaton, niin yhden prosentin lisäys polttoaineiden hinnassa aiheuttaisi 0,34 prosentin lisäyksen pääoman kysynnässä poikkileikkausaineiston kohdalla.

Taulukko 3. Mixed effects –estimaatit hintojen ristijoustoille ja Morishima-estimaateille. (Koetse et. al., 2008)

Table 3  
Mixed effects estimates for the samples of cross-price and Morishima elasticities on capital-energy substitution; equal weights per study (standard errors in parentheses)

	Cross-price elasticities	Morishima elasticities
Constant	-.066** (.011)	.216** (.072)
<i>Control variables in primary models</i>		
Materials excluded	-.012 (.011)	.129 (.081)
Returns to scale	.093** (.019)	.198* (.088)
Non-neutral technological change	-.021 (.016)	.114 (.068)
<i>Data characteristics</i>		
2-digit or 4-digit data	-.077** (.016)	.072 (.080)
Panel data	-.029* (.014)	.376** (.066)
Cross-section data	.137* (.055)	.632** (.152)
<i>Measurement of input factors and estimation method</i>		
Machinery	.123** (.038)	.130 (.067)
Electric energy	-.077** (.024)	.001 (.131)
Fuel energy	.341** (.023)	.200 (.198)
Instrumental variables	.150** (.028)	.104 (.083)
<i>Region and time period</i>		
Europe	-.045** (.017)	-.271** (.071)
Post-1973 data	.078** (.013)	.028 (.072)
Post-1979 data	.160** (.020)	.016 (.090)
Root of between study variance	.005** (.001)	.000 (.005)
N (DOF)	317 (302)	314 (299)

\*\*, \* = statistically significant at 1% and 5%, respectively.

Taulukko 4. kontrollimuuttujat taulukolle 3 selitettynä, Koetse et. al., (2008, 2245)

Kontrollimuuttujat päämalleille	
Materials excluded	Tutkimus ei sisällytä raaka-aineita tuotannontekijäksi
Returns to scale	Tutkimus sisältää olettamuksen ei-vakioisista skaalatuotoista
Non-neutral technological change	Tutkimus sisältää muuttujan ei-neutraalille teknologiselle muutokselle

Kontrollimuuttujat aineistolle	
2- or 4-digit data	Tutkimus käyttää 2-, tai 4-numeroisia lukuja kuvaamaan tuotannontekijöitä (eikä yksinumeroisia lukuja).
Cross-Section data	Tutkimuksessa käytetään poikkileikkausaineistoa
Panel Data	Tutkimuksessa käytetään paneeliaineistoa

Kontrollimuuttujat tuotannontekijämuuttujille	
Machinery	energian ja pääoman välinen substituoitu on estimoitu (ei sisällä käyttöpääomaa, kuten kassavaroja)
Electric Energy	pääoman ja sähköenergian välinen jousto on estimoitu (ei siis esimerkiksi lämpöenergiaa)
Fuel energy	pääoman ja lämpöenergian välinen substituoitu jousto on estimoitu (ei siis esimerkiksi sähköenergiaa)

Instrumental variables	Tutkimus käyttää Instrumental Variables –metodia (verrattuna tutkimuksiin, jotka eivät käytä kyseistä metodia)
------------------------	--

Alue ja ajanjakso	
Europe	Tutkimus käsittelee eurooppalaista maata, tai -maita
Post 1979-data	Tutkimus käyttää vuoden 1979 jälkeistä aineistoa
Post 1973-data	Tutkimus käyttää vuoden 1973 jälkeistä aineistoa

Taulukko 5. Erot lyhyen-, ja pitkän aikavälin Morishima-joustojen välillä Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa Koetse et. al., (2008, 2247)

Table 4

Short- and long-run Morishima elasticities for North America and Europe in the pre-1973, post-1973 and post-1979 periods (standard errors in parentheses)

	North America		Europe	
	Short-run (time series)	Long-run (cross-section)	Short-run (time series)	Long-run (cross-section)
Pre-1973	.414** (.091)	1.046** (.198)	.142 (.100)	.775** (.211)
Post-1973	.442** (.089)	1.074** (.205)	.171 (.095)	.803** (.217)
Post-1979	.429** (.111)	1.062** (.194)	.158 (.106)	.790** (.201)

The standard errors are obtained through the Delta method (see Greene, 2000, pp. 357–358). In this case they are given by  $\sum_i \text{var}(\beta_i) + \sum_{i,j} \text{cov}(\beta_i, \beta_j)$ , where  $\beta_i$  and  $\beta_j$  represent the relevant meta-regression coefficients.

\*\*, \* = statistically significant at 1% and 5%, respectively.

Taulukosta 5 huomataan, että vaikka kertoimien ero on pieni ajanjaksojen välillä, on Euroopan ja Pohjois-Amerikan joustoissa isot erot tarkasteltavalla ajanjaksolla. Taulukon 5 malli on estimoitu Pohjois-Amerikalle ja Euroopalle käyttäen selittävinä muuttujina Taulukon 3 tilastollisesti merkitseviä muuttujia. Lyhyen aikavälin datalla ei myöskään saada tilastollisesti merkitseviä tuloksia Euroopan tapauksessa, mutta Pohjois-Amerikan tapauksessa saadaan positiivisia ja

tilastollisesti merkitseviä joustoja energian hintojen ja pääoman välillä. Pitkällä aikavälillä substituuotiota tapahtuu sekä Euroopassa, että Pohjois-Amerikassa tilastollisella merkitsevyydellä. Positiiviset kertoimet tarkoittavat, että pitkällä aikavälillä energian hintojen nousu johtaa pääoman lisäämiseen energian kustannuksella. Vaikka tutkimuksen löydökset voidaan kyseenalaistaa esimerkiksi datan puutteen, mahdollisten mittausvirheiden tai puuttuvien muuttujien harhan vuoksi, tulokset viittaavat siihen, että pitkällä aikavälillä energiaa voidaan korvata pääomalla suhteellisen tehokkaasti. (Koetse et. al., 2008, 2247-2248)

Myös Sternin (2010, 23-24) mukaan pääomaa ja energiaa voidaan substituoida keskenään. Asian ekonometrinen tarkastelu on kuitenkin hänenkin mukaansa vaikeaa, sillä pääoman määrästä, hyötysuhteista ja energiankäytöstä on vaikea saada luotettavaa aineistoa. Stern (2010, 23-24) viittaakin eri tutkimuksiin, joissa on saatu energiasta ja pääomasta joko p-substituutteja tai p-komplementteja. P-substituutti tarkoittaa, että mikäli yhden tuotteen hinta kasvaa, toisen tuotteen määrän pitäisi kasvaa. P-komplementteja tuotteet ovat silloin, jos toisen hinnan kasvaessa toisen määrä vähenee. Kokonaisuudessa johtopäätöksiä energian ja pääoman substituoitavuudesta on mahdoton vetää olemassa olevan tutkimuksen perusteella. Sternin (2010, 24) mukaan vaikuttaa kuitenkin siltä, että pääoma ja energia ovat p-komplementteja lyhyellä aikavälillä ja p-substituutteja pitkällä aikavälillä. Tätä väitettä tukee myös mainitusti Koetse et. al. (2008) ainakin Euroopan aineiston tapauksessa. Ayresin & Warrin (2010, 19-21) mukaan myös fyysisen pääoman tuotanto vaatii merkittävät määrät energiaa esimerkiksi malminlouhinnan muodossa. Heidän mukaansa fyysinen pääoma, kuten koneet, ovat hyödyttömiä ilman niihin syötettävää energiaa. Tämä johtuu siitä, että erilaisilla energiaa hyödyntävillä tuotannonvälineillä on erilaiset energiavaatimukset. Lyhyellä aikavälillä tämä haittaa substituoitavuutta. Pitkällä aikavälillä fyysistä pääomaa taas ehditään korvata, jolloin substituoitavuus on helpompaa.

Constanza & Daly (1992) tutkivat pääoman ja raaka-aineiden substituoitavuutta, mukaan lukien energian ja pääoman substituoitavuutta, sekä kestävästä kehityksestä ottaen huomioon rajalliset luonnonvarat. He toteavat, että luonnonvarojen ja energian merkitystä taloudessa on mahdollisesti aliarvoitu, eikä valtavirran talouskeskustelussa juurikaan oteta huomioon energian ja ehtyvien luonnonvarojen merkitystä. Myös esimerkiksi Cobb-Douglas –tuotantofunktiota hyödyntävät makromallit olettavat, että luonnonvarojen merkitys tuotannontekijänä voi lähestyä nollaa, sillä sitä



voidaan substituoida joko työvoimalla tai pääomalla (esim. Stiglitz, 1974). Substituoitavuuden tuotannontekijöiden välillä oletetaan siis olevan vakioinen ja suuri. Constanza & Daly (1992,40-41)

Constanza & Daly (1992, 41) kuitenkin tyrmäävät pääoman ja energian/luonnonvarojen substituoitavuuden. Ensiksikin heidän mukaansa, mikäli pääoma olisi täydellinen substituuksi energialle ja luonnonvarojen tulisi vastaavasti olla täydellinen substituuksi pääomalle. Jos näin olisi, ei kuitenkaan olisi kannustinta rakentaa pääomaa hyödyntämään luonnonvaroja. Pääoma on siis kirjoittajien mukaan luonnonvarojen komplementti, ei substituuksi. Mikäli täydellinen substituuksi olisi mahdollista, öljynjalostamoita, kalastusverkkoja, sekä kaivoskoneita voisi käyttää substituuksina kaloille, raakaöljylle ja malmille, mikä ei tietenkään pidä paikkaansa. Toiseksi pääoma on fyysisen pääoman tapauksessa valmistettu luonnonvaroista, jolloin ”substituutin” valmistamiseen käytettäisiin raaka-aineita, joita substituimaan pääoma on tarkoitettu.

Constanza & Daly (1992) ovat samaa mieltä Ayresin & Warrin (2005) kanssa siitä, että raaka-aineiden muuntaminen esimerkiksi pääomaksi vaatii työvoimaa ja pääomaa. Raaka-aineet ovat tällöin tuotannontekijöitä, kun taas työvoima ja pääomakanta taas muuntavat raaka-aineet tuotteiksi. Heidän ajatusmaailmansa mukailee siis ympäristötieteen malleja, jossa energia on kaiken tuotannon perusta. He kuitenkin toteavat, että substituoitavuus on hyvinkin mahdollista esimerkiksi työvoiman ja pääoman välillä. Substituoitavuus on mahdollista myös eri energialähteiden välillä. Teknologinen kehitys voi myös tehdä joistain energianlähteistä hyödyttömiä tai vähentää niiden käyttöä kasvaneen hyötysuhteen kautta. Mutta luonnonvarat ja pääoma ovat heidän mukaansa mitä ilmeisimmin komplementteja, eivät substituuksia. On myös mahdollista saapua pisteeseen, jossa luonnonvarojen hyödyntäminen vie enemmän resursseja kuin mitä niistä saa. (Constanza & Daly, 1992, 41-43)

## 4.2 Energiatyypin substituoiminen keskenään

Energiatyypin välinen substituoiminen on Sternin (2010, 11) mukaan mahdollista, mutta ei välttämättä kovin tehokasta. Yhden yksikön korvaaminen jollakin toisella energiatyypillä voi kuluttaa tätä toista energiatyypin enemmän kuin yhden yksikön. Lämpöenergia on suhteellisen helposti substituoitavissa. Esimerkiksi puun sijaan voidaan käyttää hiiltä tai maakaasua.

Substituoitavuutta vaikeuttaa erityisesti energialähteitä hyödyntävien tuotantovälineiden erilaisuus. Hiilivoimalaa on esimerkiksi vaikea muuntaa ydinreaktoriksi tai polttomoottoriautoa sähköautoksi. Sen sijaan polttomoottoriauton muuntaminen maakaasulla toimivaksi voi olla suhteellisen halpaa, samoin kuin kivihiihivoimalan muuntaminen maakaasulla toimivaksi. Substituoitavuus on siis tapauskohtaista.

Cleveland et. al. (2000, 304) mukaan energiatyyppejä ei voida täydellisesti substituoiminen keskenään, sillä energianlähteitä hyödyntävä pääoma on erilaista. Hiilen käyttöä hiilivoimalassa ei siis voida korvata suoraan maakaasulla ja esimerkiksi sähköenergialla on korkeampi hyötysuhde kuin polttomoottorilla. Hinta vaikuttaa kuitenkin substituoimiseen pitkällä aikavälillä, mikäli energianlähteen kohonnut hinta kannustaa siihen. Mikäli energiatyypit olisivat täydellisiä substituoituvia, markkinat kuitenkin hinnoittelisivat ne samalla tavalla energiasisältöä kohden, mikä ei tällä hetkellä pidä paikkaansa.

On myös oletettavissa, että hyötysuhteeltaan korkealaatuisten energialähteiden, kuten sähköenergian ja maakaasun hyödyntäminen kokevat rajatuottavuuden laskun, kun niiden hyödyntäminen leviää. Esimerkiksi Cleveland et. al. (2000, 312-314) esittelemä energian kokonaiskäyttö/bruttokansantuote –suhde ei ole lineaarinen, vaan aluksi hyötymatasoltaan heikkoja energianlähteitä, kuten hiilivoimaa on helppo korvata jollakin muulla energianlähteellä. Ajan mittaan korkean hyötysuhteen energiamuodot kuitenkin saavuttavat niin suuren osan kokonaisenergiatuotannosta, ettei parannettavaa juuri ole.

Cleveland et. al., (2000, 316) mukaan korkeamman hyötysuhteen energianlähteiden, kuten sähkövoiman saatavuuden heikkenemisellä voisi olla suuria taloudellisia vaikutuksia. Negatiiviset

vaikutukset voisivat toteutua erityisesti, mikäli heikomman hyötysuhteen energialähteiden, kuten hiilen, käyttöä rajoitettaisiin esimerkiksi ympäristösyistä ja korkeamman hyötysuhteen energialähteiden saatavuudelle syntyisi rajoitteita. Substituutiolla on myös omat rajansa. Mikäli substituuatio heikomman hyötysuhteen energialähteistä korkeamman hyötysuhteen energialähteisiin jatkuu, lopulta kaikki energia saataisiin korkean hyötysuhteen energialähteistä ja hyötysuhteen lisääminen tulisi siten mahdolliseksi substituution kautta. Taloudelliset rajoitteet substituutiolla voivat myös estää energiankäytön hyötysuhteen kasvun. Esimerkiksi vaikka sähköenergialla on polttoaineita korkeampi hyötysuhde, on toistaiseksi epätodennäköistä, että esimerkiksi matkustuslentokoneet alkaisivat käyttää nykyteknologialla sähköä energialähteenään. (Cleveland et. al., 2000, 316)

#### 4.3 Teknologisen kehityksen vaikutus energiankulutukseen

Stern (2010, 26) kirjoittaa, että tutkimusten valossa energian hintojen nousu vaikuttaa teknologian muuttumiseen energiatehokkaammaksi. Kuitenkin laskevat energian hinnat saattavat aiheuttaa uusien, energiankulutusta lisäävien innovaatioiden syntymistä. Esimerkkinä energian hintojen vaikutuksesta energian säästämiseen voidaan käyttää Euroopan ja Yhdysvaltain autokantoja. Euroopassa autojen kokoluokka ja kulutus ovat pienempiä kuin Yhdysvalloissa, luultavasti ainakin osittain johtuen polttoaineiden suhteellisen korkeista hinnoista Euroopassa verrattuna Yhdysvaltoihin. Stern (2010, 27) huomauttaa viitaten Grübler et. alin., (1999) että energiaa säästävät innovaatiot vaikuttavat aina aluksi leviävän hitaasti korkeista valmistuskustannuksista johtuen, mutta kun uudet innovaatiot tulevat kilpailukykyisiksi, ne leviävät nopeasti. Poikkeuksena tähän ovat innovaatiot, joiden hyödyntäminen vaatii esimerkiksi olemassa olevan infrastruktuurin korvaamista.

Energiakriisit, esimerkiksi vuoden 1973 öljykriisi, ovat edesauttaneet energiatehokkuuden kasvua esimerkiksi henkilöautoissa. Öljykriisin jälkeen Yhdysvalloissa asetetut Corporate Average Fuel Economy (CAFE) –standardit auttoivat polttoaineenkulutuksen puolittamisessa vuosien 1972-1992 välisenä aikana. Tosin teknologisen kehityksen osuus polttoaineenkulutuksen puolittamisessa on kyseenalainen, sillä valtaosa säästöistä aiheutui Yhdysvalloissa ajoneuvojen painon pudottamisesta. (Ayres & Warr, 2010, 109)

Myös tuotannossa käytetyt energianlähteet ovat muuttuneet merkittävästi sitten teollisen vallankumouksen alun. Jo toisen maailmansodan aikana sähkömoottorit olivat syrjäyttäneet höyrymoottorit tehtaissa johtuen niiden paremmasta hyötysuhteesta (Kuvio 8). Höyrykoneiden hyötysuhteen kasvu 1900-luvun alussa pysähtyi ainoastaan 3-5 prosenttiin, kun taas sähkömoottorit ylsivät 30 prosentin hyötysuhteeseen 1960-luvulla. Sama kehityssuunta tapahtui esimerkiksi vetureissa, jotka lähes kaikki muutettiin toisen maailmansodan jälkeen dieselillä toimiviksi niiden suuremman hyötysuhteen vuoksi. (Ayres & Warr, 2003, 233)

Kuvio 8. Tuotantolaitteiden voimanlähteet prosenttiosuuksittain Yhdysvalloissa (pystyakseli) vuosien 1870-1940 välillä. (Ayres & Warr, 2003, 233)

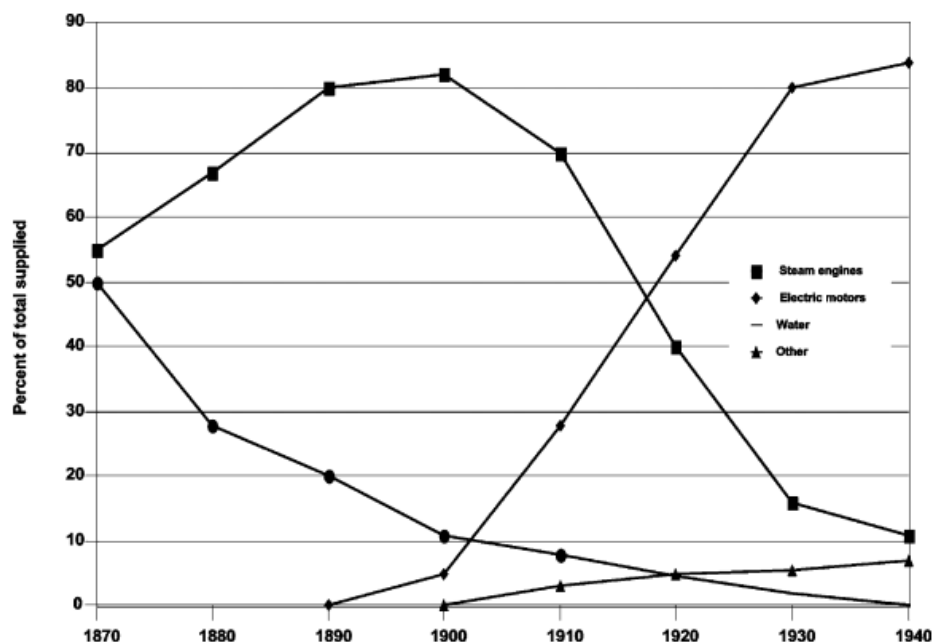


Fig. 10. Sources of mechanical drive in manufacturing establishments: USA 1869–1939. Source: [25].

Taulukko 6. Keskimääräiset hyötysuhteet (exergy efficiency) eri energianlähteille Yhdysvalloissa (prosenttia). Low temperature space heat viittaa kiinteistöjen lämmittämiseen käytettävään energiaan (Ayres & Warr, 2003, 242)

Table 3  
Average exergy efficiency of performing work, percent

Year	Electric power generation & distribution	Other mechanical work, e.g., auto transport	High temperature industrial heat (steel)	Medium temperature industrial heat (steam)	Low temperature space heat
1900	3.8	3	7	5	0.25
1910	5.7	4.4			
1920	9.2	7			
1930	17.3	8			
1940	20.8	9			
1950	24.3	9			
1960	31.3	9			
1970	32.5	8	20	14	2
1980	32.9	10.5			
1990	33.3	13.9	25	20	3

Source: authors

Taulukosta 6 huomataan, että Yhdysvalloissa erityisesti sähköntuotannon, ja –jakelun hyötysuhde on kasvanut voimakkaasti vuosien 1900-1990 välisenä aikana. Myös autojen hyötysuhde on kasvanut merkittävästi sitten polttomoottorin keksimisen. Korkeaa lämpötilaa vaativat teollisuudenalat, kuten terästeollisuus, ovat nekin onnistuneet kasvattamaan hyötysuhdetta. Sama pätee myös höyryä vaativiin tuotantotapoihin. Sen sijaan asuntolämmityksen hyötysuhde ei ole juurikaan kasvanut sitten 1900-luvun alun (Ayres & Warr, 2003, 242). Vaikka aineisto käsittelee Yhdysvaltoja, ei ole erityistä syytä olettaa, että luvut vaihtelisivat merkittävästi Euroopassa, erityisesti teollisuuden osalta, jonka täytyy pysytellä energiatehokkaana minimoidakseen kustannuksia.

Myös niin kutsutun Rebound-efektin tutkiminen on tärkeää, kun halutaan muodostaa suhde teknologiselle kehitykselle ja energian kulutukselle. Rebound-efektin mukaan kasvanut energiatehokkuus ja sitä myötä halventunut energia lisäävät energian käyttöä tulovaikutuksen kautta, mikä vähentää energiatehokkuuden kasvun vaikutuksia energiankulutukseen (Stern, 2010, 28). Mainitusti Wrigleyn (1988) mukaan teollinen vallankumous vaati tapahtuakseen halpaa

energiaa ja energian halpuus yhdistettynä työvoiman kalleuteen Englannissa verrattuna esimerkiksi Alankomaihin oli yksi pääsyy sille, miksi teollinen vallankumous tapahtui juuri Iso-Britanniassa. Toisaalta mainitusti Ayresin & Warrin (2003) mukaan energiantuotannon ja koneiden energiatehokkuus on kasvanut merkittävästi 1900-luvun alusta asti.

Sternin (2010, 28) mukaan Rebound-efekti voi tapahtua usealla eri tavalla:

1. Jonkin energianlähteen hyödyntäminen halpenee ja substitutioefektin kautta sen käyttö kasvaa merkittävästi.
2. Tulovaikutus, jonka suunta riippuu siitä, onko energia normaali-, vai inferiorinen hyödyke, joko kasvattaa tai vähentää kyseisen energiatyyppin käyttöä.
3. Energian hinnan laskusta johtuva kuluttajan tulotason kasvu johtaa taloudessa hyödykkeiden kysynnän kasvuun, mikä kasvattaa kokonaisenergiankulutusta (rakenteellinen efekti).

Berkhout et. al. (2000) tutkivat Rebound-efektiä Alankomaissa. Kirjottajat toteavat heti, että efektin löytäminen on hankalaa johtuen useista muista syistä, jotka saattavat vaikuttaa energian kysyntään, tai kuluttajan kulutus päätöksiin, tehden Rebound-efektin suorasta havainnoinnista vaikeaa. Kuviot 9-10 selventävät Rebound-efektin vaikutusta tuottajien ja kuluttajien tapauksessa. Kuviossa 9  $E$ =energia,  $K$ = energiaa hyödyntävä pääoma ja  $Y$ =kokonaistuotanto. Kokonaistuotanto  $Y$  muodostuu pääoman  $K$  ja energian  $E$  yhdistelminä. (Berkhout et. al., 2000, 426-427)

Kuvio 9 havainnollistaa rebound-efektiä tuottajien tapauksessa. Lähtöpiste on piste A, jossa tuottaja minimoi kustannuksensa energian ja sitä hyödyntävän pääoman yhdistelmällä  $E_1$  ja  $K_1$ .

Teknologinen kehitys tekee pääomasta energiatehokkaampaa. Tämä tarkoittaa, että sama määrä pääomaa tuottaa pienemmällä määrällä energiaa saman tuotoksen. Tuotannon isokvantti siirtyy vasemmalle pisteeseen  $Y^*$ . Energiankulutus siirtyy pisteestä  $E_1$  pisteeseen  $E_2$ . Tuotantoyhdistelmän osalta siirrytään pisteestä A pisteeseen B. Piste B ei kuitenkaan ole kustannukset minimoiva yhdistelmä. Kustannukset minimoiva piste on C, jossa hyödynnetään tuotannontekijämääriä  $E_3$  ja  $K_2$ . Halventunut energia siis kannustaa substituoimaan pääomaa energialla, mikä mitätöi osan hyötysuhteen kasvamisen säästövaikutuksista. (Berkhout et. al., 2000, 427)

Kuvio 9. Rebound-efekti tuottajien tapauksessa. (Berkhout et. al., 2000, 427)

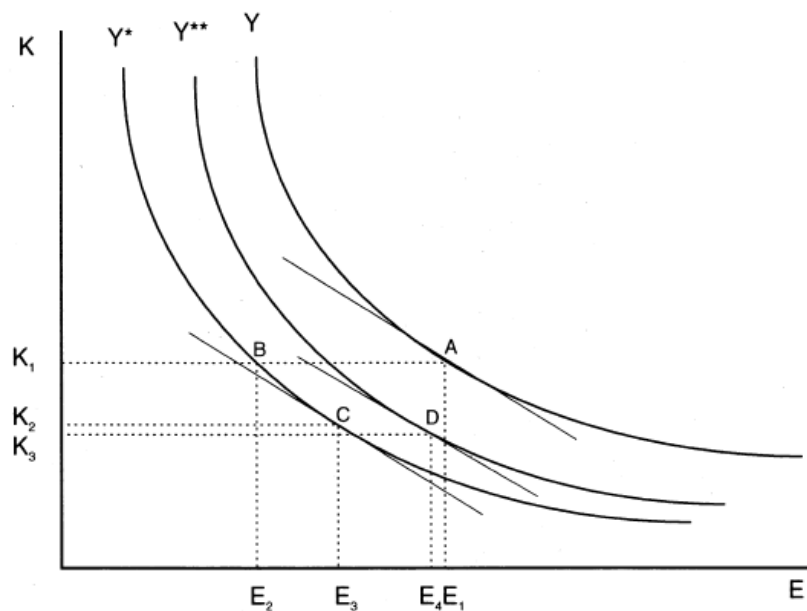
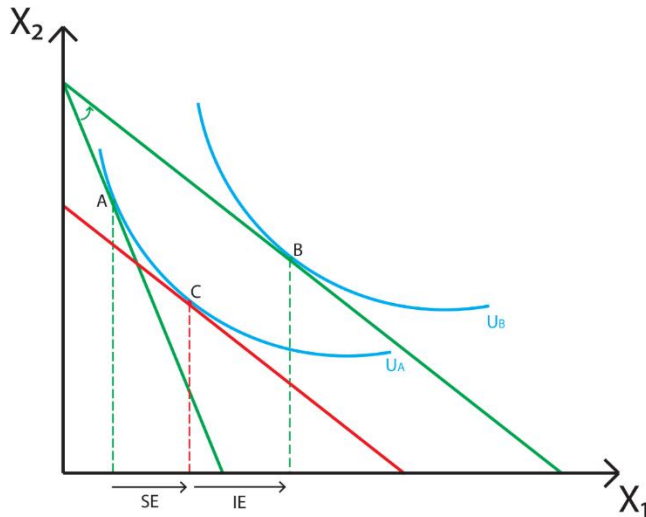


Fig. 1. The rebound effect for the producer.

Kuluttajan tapaukseen tarkastellaan kuviossa 10. Kuviossa on kaksi hyödykettä:  $X_1$  ja  $X_2$ , joilla kummallakin on oma hintansa alkutilanteessa. Kuluttaja maksimoi hyötynsä tuotteiden  $X_1$  ja  $X_2$  hintojen, sekä indifferenssikäyriensä  $U_B$  ja  $U_X$  suhteen. Alkutilanteessa kuluttaja maksimoi hyötynsä pisteessä A, kun budjettirajoite otetaan huomioon. Oletetaan, että hyödykkeen  $X_1$  hinta laskee tuotannon energiatehokkuuden kasvaessa ja kilpailun painaessa hintoja alas. Tällöin kuluttaja saisi ostettua tuloillaan saman määrän hyödykettä  $X_2$ , mutta ostettavissa olevan  $X_1$ :n määrä kasvaa, sillä tulot eivät muutu. Tätä kuvaa budjettirajoitteen siirtyminen oikealle hyödykkeen  $X_1$  tapauksessa. Kuluttajan optimi liikkuu pisteestä A pisteeseen B, missä kuluttaja maksimoi hyötynsä siirtymällä korkeammalle indifferenssikäyrälle  $U_B$ . Tulovaikutus on siis kasvattanut energiantensiivisen tuotteen  $X_1$  kulutusta, jolloin päädytään kuluttamaan enemmän energiaa kuin alkutilanteessa, vaikka tuotannon energiatehokkuus on kasvanut. Kuluttajan tapauksessa kulutus päätöksiin vaikuttavat kuluttajan indifferenssikäyrien muoto, joka saattaa johtaa tällaiseen rebound-efektiin tulovaikutuksen kautta. (Berkhout et. al., 2000, 427-428)

Kuvio 10. Esimerkki substitutio-, ja tulovaikutuksesta kuluttajan tapauksessa. (Policonomics.com, Slutsky's Equation)



Empiirisiä tuloksia Alankomaissa Berkhout et. al., (2000, 429-430) esittelee viittaamalla aiempiin tutkimuksiin. Tutkimuksiin lukeutuu muun muassa Koopmansin (1997) tutkimus pitkän aikavälin hintajoustoihin talouden eri sektoreilla, Geursin & Van Weenin (1997) tutkimus öljyn hintajoustoista, sekä Velthuijsenin (1995) tutkimus lyhyen aikavälin hintajoustoista yrityssectorilla. Vaikka tutkimukset käyttävät eri aineistoa, tutkimusmenetelmiä ja aikavälejä tutkiessaan hintajoustoja, kaikki tutkimukset päätyvät lopputulokseen, että sekä lyhyellä, että pitkällä aikavälillä energian hintojen nousu vähentää energian kulutusta. Toisin sanoen hintajousto on eri teollisuudenaloilla ja erityisesti liikenteessä negatiivinen. Viitaten Koopmansiin (1997), Boom et. al., (1998), sekä Van Es et. al., (1998) Berkhout et. al., (2000, 430) toteavat, että makrotasolla Alankomaiden tapauksessa energian hintajousto vaikuttaisi olevan noin -0,3. Eli yhden prosenttiyksikön nousu energian hinnassa aiheuttaisi noin 0,3 prosentin laskun energian käytössä.

Kaiken kaikkiaan Berkhout et. al., (2000, 431) toteavat, että taloudelliset perusteet Rebound-efektin olemassaololle ovat loogiset niin substitutio-, kuin tulovaikutuksen tapauksessa. On olemassa empiiristä dataa, joka viittaa myös rakenteellisen Rebound-efektin olemassaoloon, vaikka talouden monimutkaisuuden vuoksi energian hintojen vaikutuksen eristäminen muista tekijöistä on aina



kyseenalaista. Rebound-efekti vaikuttaisi kuitenkin olevan pieni Alankomaiden tapauksessa ja niillä sektoreilla, joilla se vaikuttaa eroavan nollasta (kuten kotitalouksien valaisemisessa) sen osuus kokonaisenergiankulutuksesta on niin pieni, ettei siihen puutumiseen kannata tehdä poliittisia päätöksiä.

## 5. Empiiristen tutkimusten tuloksia energiankulutuksen ja BKT:n kasvun suhteesta

Payne (2010) on laatinut kirjallisuuskatsauksen talouskasvun ja energian kulutuksen kasvua tutkivista empiirisistä tutkimuksista. Kirjallisuuskatsauksessa käsitellyt tutkimukset perustuvat pääosin Granger-, ja Sims –kausaalisuustesteihin. Granger-Sims –kausaalisuustestit pyrkivät etsimään kausaalisuussuhdetta selitettävän ja selittävien muuttujien välillä luomalla yhden yhtälön kullekin muuttujalle ja selittämällä kutakin muuttujaa muiden muuttujien viiveillä. Mikäli selittävä muuttuja on tilastollisesti merkitsevä, voidaan sen katsoa Granger-aiheuttavan selitettävää muuttujaa viivepituudella  $n$ . Viivepituudet voidaan määritellä muun muassa viiveiden tilastollisen merkitsevyyden perusteella tai spesifikaatiotestin, kuten AIC:n (Akaike's Information Criteria) perusteella. Paynen (2010, 55) mukaan tulokset ovat jakautuneita kausaalisuuden suhteen kaikilla eri taloustyypeillä, kuten kehittyneillä ja kehittyvillä talouksilla, eikä minkäänlaisia johtopäätöksiä voi tulosten perusteella tehdä. Tutkimuksia saattavat lisäksi vääristää puuttuvien muuttujien harha, mittausvirheet aineistossa ja tutkimusten sijoittuminen eri ajanjaksoille. Paynen (2010, 83) mukaan hyvin harvassa kausaalisuutta testaavassa tutkimuksessa on otettu huomioon mahdollisia rakenteellisia muutoksia aineistossa, mikä saattaa vääristää tuloksia huomattavasti.

Cleveland et. al. (2000, 309-310) mukaan suuri osa energiankulutuksen ja talouskasvun välisen suhteen tutkimuksista unohtaa energian laadun vaikutuksen huomioon ottamisen. Tutkimuksissa tarkastellaan usein energiankulutusta aggregoituna. Tämä tarkoittaa, että esimerkiksi vesivoimalan tuottama energia muunnetaan joksikin toiseksi yksiköksi, esimerkiksi kilogrammoiksi öljyä henkeä kohden. Vaikka energiasisältö voi olla jouleina mitattuna sama, öljyä ja esimerkiksi vesivoimalan tuottamaa sähköä käytetään usein eri tarkoituksiin. Tässä tapauksessa öljyä saatetaan käyttää polttomoottorissa, jossa on heikko hyötysuhde, kun taas sähköä hyödyntävissä laitteissa hyötysuhde on usein huomattavasti korkeampi. Vesivoimalla tuotetun sähköenergian tapauksessa exergian määrä on todennäköisesti siis suurempi kuin polttomoottorilla tuotetun. Tutkimukset saattavat kuitenkin käsitellä ainoastaan energian kokonaiskulutusta ottamatta huomioon sitä, kuinka paljon energiasta oikeasti hyödynnetään. Tämä saattaa aiheuttaa merkittäviä mittaus-, ja tulkintavirheitä tilastollisessa tutkimuksessa.

Paynen (2010, 83) mukaan Granger-kausalisuustestit ovat hyvä tapa tutkia esimerkiksi energiankulutuksen ja talouskasvun välistä suhdetta, mutta testeissä pitää ottaa huomioon puuttuvan muuttujan harha, aikasarjan stationaarisuus tai yhteisintegroituvuus, sekä mahdolliset rakenteelliset muutokset aineistossa. Tiivistettäessä kirjallisuuskatsauksen tulokset Paynen (2010, 85) mukaan kehittyneiden maiden tapauksessa saadaan tulokseksi, että 32,1 prosenttia tuloksista viittaa molempiin suuntiin kulkevaan kausaalisuuteen, 30,4 prosenttia viittaa siihen, ettei kausaalista suhdetta ole, 21,4 prosenttia viittaa siihen, että kausaalisuus kulkee energian kulutuksesta talouskasvuun ja 16,1 prosentin mukaan kausaalisuus kulkee talouskasvusta energian kulutukseen.

Sharma (2010) tutkii energiantuotannon ja talouskasvun suhdetta paneeliaineistolla 66 eri maassa. Mallinaan hän käyttää seuraavaa yhtälöä (Sharma, 2010, 3567):

$$gy_t = \alpha_0 + \alpha_1 INF_t + \alpha_2 GFCF_t + \alpha_3 TRADE_t + \alpha_4 gLF_t + \alpha_5 Energy_t + \varepsilon_t \quad (21)$$

missä  $g$ =kasvu,  $y_t$ = bruttokansantuote  $INF_t$ =inflaatio,  $GFCF_t$ =kasaantunut pääomakanta (capital stock),  $TRADE_t$ =kaupan avoimuus,  $gLF_t$ =työvoiman kasvu,  $Energy_t$ =aggregoitu energiankulutus,  $\varepsilon_t$ =virhetermi. Muuttujista inflaatiolla ja pääomalla odotetaan olevan tilastollisesti merkitsevä vaikutus talouskasvuun. Inflaatio pienentää kannustimia pitää rahaa korkoa tuottamassa ja kannustaa siirtämään varallisuutta investointeihin, nostaa BKT:n kasvua. Pääoman määrä taas vaikuttaa suoraan tuotantomahdollisuuksiin, kuten Solow (1956) esittää Solowin kasvumallissaan. Kaupan avoimuudella ja työvoiman määrällä odotetaan olevan positiivinen tai tilastollisesti merkitsemätön vaikutus talouskasvuun. Tämä johtuu siitä, että työvoimaa ei aina täysin hyödynnetä, jolloin ylimääräinen työvoima ei välttämättä vaikuta positiivisesti talouskasvuun. Viitaten Batraan (1992) Sharma toteaa, että kaupan avoimuus voi myös potentiaalisesti pienentää BKT:n kasvua pienentämällä kotimaisten tuottajien hintoja vapaakaupasta johtuvan koventuneen kilpailun myötä, vaikuttaen negatiivisesti yritysten haluun investoida kotimaahan ja siten talouskasvuun. (Sharma, 2010, 3567-3568)

Energiankulutuksen tilastollista merkitsevyyttä tutkitaan eri maantieteellisillä alueilla ja eri energiatyypeittäin. Sharma (2010) muodostaa kuusi muuttujaa kuvaamaan energian merkitystä taloudessa. Mittayksikkönä on energian käyttö seuraavissa energianlähteissä: öljynkulutus henkeä

kohden, öljyn kokonaiskulutus, sähkönkulutus, energiantuotanto ja fossiilisten polttoaineiden osuus energian kokonaistuotannosta. Pääoman määrää kuvaavaa muuttujaa mitataan aineistossa kiinteän pääoman määrän muutoksilla kokonaispääoman määrää koskevan aineiston puutteista johtuen. (Sharma, 2010, 2568)

Taulukko 7. Tulokset Euroopan ja Keski-Aasian aineistosta. P-arvot sulkeissa. (Sharma, 2010, 3570).

**Table 3**  
Results for the Europe and Central Asian panel.

	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7
Inflation	-0.00003 (0.973)	0.0005 (0.5051)	0.0005 (0.508)	0.0003 (0.6718)	0.0000 (0.994)	0.0002 (0.8023)	-0.000 (0.9015)
GFCF	0.189* (0.0000)	0.188* (0.000)	0.188* (0.000)	0.182* (0.0000)	0.189* (0.000)	0.193* (0.0000)	0.1905* (0.0000)
Trade	0.014*** (0.0536)	0.0129*** (0.1000)	0.0129*** (0.0984)	0.0157** (0.0343)	0.0137*** (0.0637)	0.017** (0.0413)	0.0147** (0.039)
Labour force	0.0612 (0.5551)	0.0696 (0.4908)	0.0643 (0.5220)	0.0579 (0.5818)	0.0583 (0.5731)	0.0349 (0.7359)	0.0516 (0.6189)
E1	-	0.061** (0.013)	-	-	-	-	-
E2	-	-	0.062** (0.015)	-	-	-	-
E3	-	-	-	0.104* (0.007)	-	-	-
E4	-	-	-	-	0.004 (0.3856)	-	-
E5	-	-	-	-	-	0.039** (0.0182)	-
E6	-	-	-	-	-	-	-0.035 (0.1959)

Notes: GFCF – gross fixed capital formation; E1 – energy use (kg of oil equivalent per capita); E2 – energy use (kt of oil equivalent); E3 – electric power consumption (kWh); E4 – electricity production (kWh); E5 – energy production (kt of oil equivalent); E6 – fossil fuel energy consumption (% of total).

\* Denotes statistical significance at the 1% level.

\*\* Denotes statistical significance at the 5% level.

\*\*\* Denotes statistical significance at the 10% level.

Taulukossa 7 esitellään mallin tulokset. Tuloksista huomataan, että muuttujista pääomalla ja kaupan avoimuudella on positiivinen suhde kasvun kanssa. Näiden kahden muuttujan tilastolliset merkitsevyydet eivät muutu yhdessäkään seitsemästä mallista. Energiamuuttujista kaikilla muilla, paitsi energiantuotannolla ja fossiilisten polttoaineiden suhteella on tilastollisesti merkitsevä, positiivinen vaikutus kasvuun. Mallin mukaan esimerkiksi yhden prosentin lisäys öljyn käytössä lisää talouskasvua 0,061 prosenttia. (Sharma, 2010, 3569-3570)

Kriittiseksi kysymyksiksi voisi esittää, ovatko mallit oikein spesifioitu, kuinka hyvää dataa on käytetty ja tärkeimpänä, kuinka hyvin paneeliaineistosta voidaan vetää kausaalisia johtopäätöksiä. Sharman (2010) malli osoittaa melko vakuuttavasti, että energiankulutuksella sen eri muodoissa on jonkinlainen suhde talouskasvun kanssa, mutta kausaalisuuden suunnasta tai olemassaolosta malli ei kerro mitään. Koska tilastoaineisto pääoman määrästä on hataraa, kuten Sharma (2010, 3568) mainitsee, voivat saatujen tulosten kertoimet olla harhaisia. Myös kaupan avoimuutta heijastava

indeksi voi olla subjektiivinen ja siten altis harhaisuudelle. Mallista voi myös uupua tärkeitä puuttuvia muuttujia.

Ozturk et. al., (2010) ovat myös julkaisseet kirjallisuuskatsauksen talouskasvun ja energiankulutuksen suhteesta kehittyvien maiden tapauksessa. He jakavat muiden tutkijoiden mielipiteet, joiden mukaan yksinomaan kehittyvien maiden tapauksessa ei ole löydettävissä yksiselitteistä kausaalisuussuhdetta energiankulutuksen ja talouskasvun välillä. Kehittyvien talouksien energiankulutuksen ja talouskasvun tarkasteleminen on tärkeää, sillä alhaisen tulotason maissa kausaalisuhteen voi olettaa olevan selkeämpi kuin kehittyneissä maissa (Ozturk et. al., (2010, 4423-4424). Tämä johtuu siitä, että kehittyvät maat eivät välttämättä ole teollistuneita, jolloin energiankulutuksen lisääntymisellä voi olla selkeämpiä vaikutuksia talouskasvuun kuin kehittyneiden maiden tapauksessa.

Kausaalisuutta testataan paneeliyhteisintegroituvuudella muuttujina BKT:n muutos ja energiankulutuksen muutos kerran differentioituina. Taulukosta 8 huomataan, että I(1) muotoon differentioituna saadaan muuttujista stationaarisia. Muuttujat, tässä tapauksessa maaryhmät tulotasoittain, ovat siis yhteisintegroituneet astetta yksi energiankulutuksensa ja bruttokansantuotteen suhteen. Tarkasteltava aikaväli on 1971-2005. Mahdollisia rakenteellisia muutoksia aineistossa ei kuitenkaan tarkastella, mikä saattaa vääristää tuloksia.

Taulukko 8. Yksikköjuuritestin tulokset alhaisen-, alemman keskitulon-, ja ylemmän keskitulon maille. (Ozturk et. al., (2010, 4424)

**Table 3**  
IPS panel unit root test results.

	Variables	Level		First Difference	
		Without trend	With trend	Without trend	With trend
Low income countries	GDP	5.29	2.40	-13.12*	-14.72*
	EC	1.81	-5.80*	-18.83*	-17.05*
Lower middle income countries	GDP	-0.48	-0.89	-17.09*	-15.60*
	EC	0.25	-0.01	-19.60*	-17.64*
Upper middle income countries	GDP	1.45	-1.80	-11.19*	-11.25*
	EC	-1.11	-1.45	-14.72*	-13.19*

Note: (\*) 99% confidence level. Optimal lag determination is based on Schwarz Bayesian Information Criterion (SBIC).

Tämän jälkeen Ozturk et. al. (2010, 4424) esittävät yhtälöt kausaalisuuden tarkastelemiseen paneeliaineiston tapauksessa:

$$\Delta \ln GDP_{it} = \varphi_{1i} + \sum_p \varphi_{11ip} \Delta \ln GDP_{it-p} + \sum_p \varphi_{12ip} \Delta \ln EC_{it-p} + \Psi_{1i} ECT_{t-1} \quad (22)$$

$$\Delta \ln EC_{it} = \varphi_{2i} + \sum_p \varphi_{21ip} \Delta \ln EC_{it-p} + \sum_p \varphi_{22ip} \Delta \ln GDP_{it-p} + \Psi_{2i} ECT_{t-1} \quad (23)$$

Missä EC=energian kulutus, GDP=bruttokansantuote, ECT=virheenkorjaustermi. Kausaalisuutta testataan hypoteeseilla:

$$H_0: \varphi_{12ip} = 0$$

ja

$$H_0: \varphi_{22ip} = 0$$

testaus suoritetaan malleissa i maalle ja p viiveelle.

Testin tulokset esitellään taulukossa 9. Huomataan, että ainoastaan alhaisen tulotason maiden tapauksessa saadaan tilastollisesti merkitsemätön tulos hypoteesille, että energiankulutuksen kasvu aiheuttaa bruttokansantuotteen kasvua. Alhaisen tulotason maiden tapauksessa kausaalisuussuhde kulkee talouskasvusta energiankulutukseen, muttei energiankulutuksesta bruttokansantuotteen kasvuasteeseen. Vastaavasti muut muuttujat ovat kaikki tilastollisesti merkitseviä 1 prosentin luottamusvälillä, eli keski-, ja korkean tulotason maissa kausaalisuussuhde kulkee energiankulutuksesta bruttokansantuotteeseen ja päinvastoin. Muissa kuin alhaisen tulotason

maiden tapauksessa häiriöt energiantuotannossa saattavat siis vaikuttaa negatiivisesti bruttokansantuotteen kasvuun. (Ozturk et. al., 2010, 4425)

Taulukko 9. Granger-kausalisuustestin tulokset paneeliaineistolle. (Ozturk et. al., 2010, 4425)

**Table 5**

Panel Granger causality test results.

	Source of Causation	$\Delta \ln \text{GDP}$	$\Delta \ln \text{EC}$	$\text{ECM}_{t-1}$
<b>Low income countries</b>	$\Delta \ln \text{GDP}$	–	0.000(0.064)	0.841*(0.703)
	$\Delta \ln \text{EC}$	0.141*(0.270)		1.086*(0.052)
<b>Lower middle income countries</b>	$\Delta \ln \text{GDP}$	–	0.348*(0.039)	0.738*(0.070)
	$\Delta \ln \text{EC}$	0.533*(0.042)		0.975*(0.054)
<b>Upper middle income countries</b>	$\Delta \ln \text{GDP}$	–	0.608*(0.052)	0.988*(0.057)
	$\Delta \ln \text{EC}$	0.621*(0.059)		0.735*(0.058)

Note: Standard errors are in parentheses and \* denotes statistical significance at the 1% level.

Ozturk et. al. (2010) tutkimuksen tulokset osoittavat, että vaikka korkean tulotason maille ei näytetä löytävän yhdenmukaista kausalisuussuhdetta, kehittyvien maiden tapauksessa kausalisuus näyttää kulkevan molempaan suuntaan lukuun ottamatta köyhimpiä maita, jossa energiantuotannon kasvu ei aiheuta muutosta bruttokansantuotteessa.

## 6. Empiirinen osa: energiankulutuksen, sähkönkulutuksen ja reaalisen BKT:n suhde Euroopassa

### 6.1 Tutkimusongelma ja testausmenetelmät

Tutkimuksen empiirisessä osassa tarkastellaan per capita-, ja logaritimuodossa olevien kokonaisenergiankulutuksen, sähkönkulutuksen, sekä reaalisen BKT:n suhdetta kuudessa Euroopan maassa: Iso-Britanniassa, Ranskassa, Alankomaissa, Belgiassa, Ruotsissa, sekä Itävallassa. Tutkimusaineisto on haettu Maailmanpankin (World Bank) tietokannasta. Aineisto on vuosidataa aikaväliltä 1960-2014. Koko bruttokansantuotteen lisäksi kyseisille maille testataan teollisuustuotannon ja energiankulutuksen-, sekä sähkönkulutuksen suhdetta. Teollisuustuotannon aineisto on vajavaisempaa, joten tarkasteltava aikaväli vaihtelee maittain. Teollisuustuotannon osalta tutkimuksessa keskitytään maihin, joista aineistoa on saatavilla vähintään 1980-luvun alusta lähtien. Teollisuustuotantoa tutkimuksessa mitataan teollisuustuotannon dollarimääräisellä osuudella kokonaistuotannosta. Kokonaisenergiankulutukseen sisältyy sähkönkulutuksen lisäksi muun muassa polttoaineiden kulutus ja arvio biomassan kulutuksesta, kuten polttopuiden käytöstä talojen lämmityksessä. Tutkimus keskittyy juuri näihin Euroopan maihin, koska ne ovat oletettavasti olleet teollistuneita yhteiskuntia jo ennen aikasarjan alkua, sekä ovat suhteellisen samankaltaisia talouksia (markkinatalouspohjaisia, lauhkea ilmasto). Kyseiset maat eivät myöskään ole kohdanneet aikavälillä suuria rakenteellisia muutoksia (kuten esimerkiksi Saksa Saksojen yhdistymisen vuoksi) tai siirtymistä maatalouspohjaisesta taloudesta teolliseen talouteen, kuten esimerkiksi useissa Etelä-Euroopan maissa.

Tutkittavana hypoteesina on tutkia, johtuuko mahdollinen talouskasvun ja kokonaisenergiankulutuksen kasvun eriytyminen siirtymisestä korkeamman hyötysuhteen energianlähteisiin, tässä tapauksessa sähköenergiaan. Tähän suuntaan viittaisivat esimerkiksi Ayresin & Warrin (2003), sekä Cleveland et. al. (2000) tutkimukset, joita on tässä tutkimuksessa käsitelty aiemmin. Tällöin voidaan olettaa, että mikäli energiankulutuksella ja talouskasvulla on vielä jokin vahva yhteys, talouskasvulla ja sähkönkulutuksella pitäisi olla jonkinlainen kausaalinen suhde. Sen sijaan kokonaisenergiankulutuksella ja talouskasvulla ei välttämättä tarvitse olla



kausaalista suhdetta. Jonkinlainen kausaalisuussuhde on oletettavissa ainakin teollisuustuotannolle ja jommallekummalle energiamuuttujalle, sillä energia on merkittävä osa teollisuustuotantoa.

Mikäli minkäänlaista suhdetta ei löydy, se ei vielä tarkoita, etteikö energialla ja talouskasvulla olisi minkäänlaista yhteyttä. Voi esimerkiksi olla, että eniten energiaa kuluttava raskas teollisuus on ulkoistettu pois tarkasteltavasta maasta ja teollisuustuotanto on siirtynyt vähemmän energiaa kuluttavien tuotteiden valmistukseen. Voi myös olla, että energiatehokkuuden kasvu on heikentänyt muuttujien välistä yhteyttä, vaikka tämän pitäisi teoriassa näkyä sähkönkulutusmuuttujan ja teollisuustuotannon yhteydessä tilastollisesti merkitsevästi.

Testauksessa noudatetaan osittain Faizalin & Eatzazin (2010) tutkimuksesta tuttua polkua. He tutkivat BKT:n kasvun ja energiankulutuksen, sekä sähkön hintojen suhdetta Pakistanissa. Jotta kausaalisuhdetta voidaan tutkia, täytyy muuttujien olla stationaarisia  $I(0)$  tai yhteisintegroituneita astetta yksi  $I(1)$ . Aikasarja voi olla myös integroitunut astetta kaksi tai enemmän, mutta tässä tutkimuksessa pysytellään joko  $I(0)$  tai  $I(1)$  –aikasarjojen tarkastelussa johtuen korkeamman asteen aikasarjojen tulkitsemisen monimutkaisuudesta. Aikasarjan voi sanoa olevan heikosti stationaarinen, jos sen odotusarvo ja varianssi ovat äärellisiä ja vakioita (eivät riipu ajanhetkestä  $t$ ) ja autokovarianssit riippuvat vain viivepituudesta  $k$ , mutteivät ajanhetkestä  $t$ . Aikasarja on vahvasti stationaarinen, mikäli sen ominaisuudet eivät riipu aikaindeksin lähtöpisteestä. (Koop, 2008, 195-197)

Aikasarja on integroitunut astetta yksi, mikäli aikasarja muuttuu kerran differentioimalla stationaariseksi (Koop, 2008, 217-220). Stationaarisuutta voidaan tarkastella autoregressiivisellä yhden viiveen AR(1) prosessilla:

$$y_t = \theta y_{t-1} + \varepsilon_t \Leftrightarrow (1 - \theta L)y_t = \varepsilon_t \quad (24)$$

missä  $\theta$ =käänteispolynomi,  $\varepsilon_t$ =virhetermi ja josta on otetaan varianssi puolittain:

$$V(y_t) = \theta^2 V(y_{t-1}) + V(\varepsilon_t) \quad (25)$$

Stationaarisuus edellyttää nyt, että  $V(y_t) = V(y_{t-1})$ . Sijoittamalla tämä edelliseen saadaan  $V(y_t) = \frac{\sigma_\varepsilon^2}{1-\theta^2}$ , joka on äärellinen ja positiivinen vain jos  $|\theta| < 1$ . Jos  $\theta = 1$ , niin prosessilla on yksikköjuuri ja se on random walk (satunnaiskulku). Prosessilla ei tällöin ole vakioista varianssia, eikä odotusarvoa, eli se ei ole stationaarinen (Greene, 2000, 982-983). Mikäli prosessin differenssi  $\Delta y_t$  on stationaarinen, niin prosessi on integroitunut astetta yksi. Esimerkiksi satunnaiskulun tapauksessa:

$$y_t = y_{t-1} + \varepsilon_t \Leftrightarrow y_t - y_{t-1} = \varepsilon_t \Leftrightarrow \Delta y_t = \varepsilon_t$$

Tutkimuksessaan Faisal & Eatzaz (2010, 6019) tarkastelevat aikasarjojen integroituneisuuden astetta ADF-testillä (Augmented Dickey Fuller test). Testi on muotoa:

$$\Delta y_t = \beta_0 + \theta y_{t-1} + \gamma_1 \Delta y_{t-1} + \gamma_2 \Delta y_{t-2} + \dots + \gamma_p \Delta y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (26)$$

Mallissa selitetään siis kerran differentioitua aikasarjan arvoa vakiotermillä  $\beta_0$ , differentioimattoman arvon viiveellä  $y_{t-1}$ , sekä differentioitujen arvojen viiveillä, joiden sisällyttäminen voidaan toteuttaa ottamalla tarkasteluun mukaan tilastollisesti merkitsevät viiveet tai määrittelemällä sopiva viivepituus jollakin spesifikaatiotestillä, kuten AIC:lla (Akaike Information Criteria). Mikäli regressiokerroin  $\theta < 0$  ja se on tilastollisesti merkitsevä, on aikasarja integroitunut astetta yksi (Faisal & Eatzaz, 2010, 6019-6020). Testissä testataan siis hypoteesia:

$$H_0: \theta = 0 \text{ (yksikköjuuri)}$$

$$H_1: \theta < 0 \text{ (stationaarinen)}$$

Testaukseen käytettävä testisuure on:

$$DF = \frac{\hat{\theta} - 1}{se(\hat{\theta})} \quad (27)$$

Missä  $\hat{\theta}$  on selitettävän muuttujan havaittu, viivästetty arvo ja  $se(\hat{\theta})$  keskivirhe. ADF-testin kriittiset arvot löytyvät liitteestä 3. Mikäli aikasarjat ovat integroituneet joko astetta I(0) tai yhteisintegroituneet astetta I(1), siirrytään aineistolla suorittamaan yhden selittävän muuttujan 2-step Engle-Granger –testi yhteisintegroituvuudelle. Mikäli muuttujat ovat yhteisintegroituneita, luodaan muuttujien välille ADL-mallista (Autoregressive Distributed Lag) muokattu virheenkorjausmalli (Koop, 2008, 229-232).

Koopin (2008, 218-224) mukaan muuttujat ovat yhteisintegroituneet, mikäli kahden I(1) muuttujan välillä on pitkän aikavälin tasapainorelaatio, johon muuttujien arvot pyrkivät palaamaan epätasapainotilanteista. Tällöin muuttujilla on yhteinen stokastinen trendi. Riippuvuus voidaan todeta esimerkiksi tarkastelemalla muuttujien tasapainopoikkeaman  $z_t$  stationaarisuutta:

$$z_t = Y_t - \alpha - X_t \quad (28)$$

Missä  $Y_t, X_t$ =selitettävä ja selittävä muuttuja,  $\alpha$ =vakio. Mikäli  $z_t$  vaikuttaa olevan stationaarinen, voi muuttujilla olla yhteisintegroiva suhde.

Jotta muuttujat olisivat yhteisintegroituneita, tulee yhteisintegroivan regression virhetermin  $\varepsilon_t$  olla stationaarinen. Tätä voidaan tarkastella Engle-Granger –testillä (Koop, 2008, 227-229):

$$\Delta\varepsilon_t = \gamma_0 + \gamma_1\varepsilon_{t-1} + u_t \quad (29)$$

Missä  $u_t$  virhetermi ja  $\gamma_0$  vakio. Hypoteesina testissä on:

$H_0: (\gamma_1 = 0) \varepsilon_t$ : llä yksikköjuuri

$H_1: (\gamma_1 < 0) \varepsilon_t$  stationaarinen

Testisuure noudattaa DF-taulukkoa, sekä -jakaumaa.

Yhteisintegroituneisuutta voidaan tarkastella myös Cointegrating Regression Durbin-Watson – testillä (CRDW-testi). Testisuure on muotoa (Greene, 2000, 967-970):

$$DW = \sum_{t=2}^T \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^T \varepsilon_t^2} \approx 2(1 - \hat{\rho}) \quad (30)$$

missä havaittu arvo  $\hat{\rho}$  estimoidaan mallista:

$$\varepsilon_t = \rho \varepsilon_{t-1} + v_t \quad (31)$$

Missä  $\varepsilon_t$  alkuperäisen mallin virhetermi ja  $v_t$  estimoitavan yhtälön virhetermi. DW-testillä testataan virhetermin autokorreloituneisuutta, eli sitä, pystytäänkö virhetermin viivästetyllä arvolla selittämään virhetermin nykyistä arvoa. DW-testisuure saa arvoja välillä 0-4. Testisuuren arvo  $DW < 2$  on merkki positiivisesta autokorrelaatiosta ja  $DW > 2$  negatiivisesta autokorrelaatiosta (Koop, 2008, 146-147). Yhteisintegraation tapauksessa nollahypoteesi positiiviselle autokorrelaatiolle on siis:

$H_0$ : Residuaali ei stationaarinen.  $DW - testisuure < kriittinen\ arvo$

$H_1$ : Residuaali stationaarinen.  $DW - testisuure > kriittinen\ arvo$

Kriittiset arvot 5 prosentin luottamusvälillä positiivisen autokorrelaation tapauksessa löytyvät liitteestä 3. Negatiivinen autokorrelaatio saadaan laskemalla  $4 - DW - testisuuren$  arvo samasta taulukosta.

Kun integroituneisuuden aste on määritelty yllä esitetyillä testeillä, voidaan muuttujien välillä luoda virheenkorjausmalli (Koop, 2008, 229-233). Malli johdetaan Autoregressive Distributed Lag – mallista (ADL-malli), joka kuvaa muuttujien keskistä hidasta sopeutumista. Esimerkiksi yhden selittävän muuttujan ja yhden viiveen malli ADL(1,1) on muotoa:

$$Y_t = \delta + \theta Y_{t-1} + \tau_0 X_t + \tau_1 X_{t-1} + \varepsilon_t \quad (32)$$

termi  $\tau_0$  antaa nyt X:n muutoksen välittömän vaikutuksen samalla periodilla. Pitkän aikavälin vaikutus pysyvälle X:n muutokselle saadaan, kun lasketaan:

$$\frac{\partial Y}{\partial X} = \frac{\tau_0 + \tau_1}{1 - \theta} = \frac{X \text{ kertoimien summa}}{1 - \text{viivästettyjen } Y \text{ kertoimien summa}} \quad (33)$$

Tästä saadaan X:n yhden yksikön pysyvän muutoksen aiheuttama pysyvä muutos Y:ssä pitkällä aikavälillä. ADL-mallista saadaan stationaaristen muuttujien tapauksessa virheenkorjausmalli ottamalla alkuperäisestä mallista differenssit (Greene, 2000, 994-996):

$$\begin{aligned} \Delta Y_t &= \delta - (1 - \theta)Y_{t-1} + \tau_0 \Delta X_t + (\tau_0 + \tau_1)X_{t-1} + \varepsilon_t \\ \Rightarrow \Delta Y_t &= \tau_0 \Delta X_t - (1 - \theta)[Y_{t-1} - \alpha - \beta X_{t-1}] + \varepsilon_t \end{aligned} \quad (34)$$

Missä  $\alpha, \beta$  ovat pitkän aikavälin kertoimet. Hakasuluissa oleva yhtälö on virheenkorjaustermi tai tasapainopoikkeama. Jotta virheenkorjaustermillä olisi pitkän aikavälin tasapaino, täytyy termin  $|\theta| < 1$ . ADL-, sekä virheenkorjausmallit voidaan estimoida OLS-menetelmällä, mikäli Y ja X ovat stationaarisia tai yhteisintegroituneita ja virhetermi  $\varepsilon_t$  täyttää Gauss-Markov –oletukset.

Yhteisintegroituneille, ei stationaarisille muuttujille malli on muotoa (Greene, 2000, 997-998):

$$\Delta Y_t = \delta + \tau_1 \Delta X_{t-1} + \gamma[Y_{t-1} - \beta X_{t-1}] + \varepsilon_t \quad (35)$$

missä  $\delta$ =vakiotermi,  $\tau_1, \gamma$  ovat kerroinmuuttujia,  $\Delta X_{t-1}$  edellisen periodin selittävän muuttujan differenssi,  $\varepsilon_t$  jäännöstermi, sekä hakasulkeissa oleva yhtälö on virheenkorjaustermi.

OLS-estimaatit tai yhteisintegraatiotestit voivat antaa kuitenkin harhaisia tuloksia, mikäli aineistossa on ns. rakennemuutos. Tämä johtuu siitä, että aikasarja-aineistossa muuttujien vaikutukset selitettävään muuttujaan voivat vaihdella yli ajan (Greene, 2000, 189-192). Tämän tutkimuksen tapauksessa esimerkiksi vuoden 1973 öljykriisi on saattanut aiheuttaa muutoksen autojen kulutuksessa aiemmin mainittujen CAFE-standardien myötä ja aiheuttaa siten rakenteellisen muutoksen energiankulutuksen ja bruttokansantuotteen suhteessa. Toinen mahdollinen rakenteellisen muutoksen piste on vuosi 1980, jolloin raaka-aineiden hinnat olivat inflaatiokorjattuina korkeimmalla tasollaan sitten toisen maailmansodan, mikä on saattanut johtaa energiansäästötoimiin tarkasteltavissa maissa ja siten muuttaa esimerkiksi energiankulutuksen kasvuvauhtia. (Cashin et. al., 2001).

Rakennemuutostestejä on useita, mutta tässä tutkimuksessa käytetään Chown rakennemuutostestiä. Chow-testissä rakennemuutos perustuu rajoitetun ja rajoittamattoman mallin vertailuun. Rajoittamaton malli tarkoittaa tässä mallia, joka on estimoitu koko aikavälin aineistolla. Rajoitettu malli on estimoitu esimerkiksi rajoitetun aineiston kahdelle eri aikavälille erikseen. Mallin hypoteesit ovat (Greene, 2000, 210-211):

$H_0$ : ei rakenteellista muutosta.  $F - arvo < kriittinen\ arvo$

$H_1$ : aineistossa rakenteellinen muutos.  $F - arvo > kriittinen\ arvo$

Testaus suoritetaan 5 prosentin luottamusvälillä. Tulosten perusteella voidaan F-testisuure laskea seuraavasti:

$$F = \frac{\frac{RSS_r - RSS_{ur}}{K}}{\frac{RSS_{ur}}{N - 2K}} \sim F(K, N - 2K) \quad (36)$$

Missä  $RSS_{ur}$  jäännösneliösumma rajoittamattoman mallin estimoiduista ryhmistä ( $RSS_0 + RSS_1$ ).  $RSS_r$  on jäännösneliösumma rajoitetusta mallista, eli koko aineistolle estimoitu malli.  $N$  on havaintojen lukumäärä,  $K$  muuttujien määrä pois lukien vakiotermi. Testissä oletetaan, että malleille estimoitu virhetermi  $\varepsilon_t$  on homoskedastinen, eli sen varianssi on vakio. Mallin kriittiset arvot noudattavat F-jakaumaa (Greene, 2000, 210).

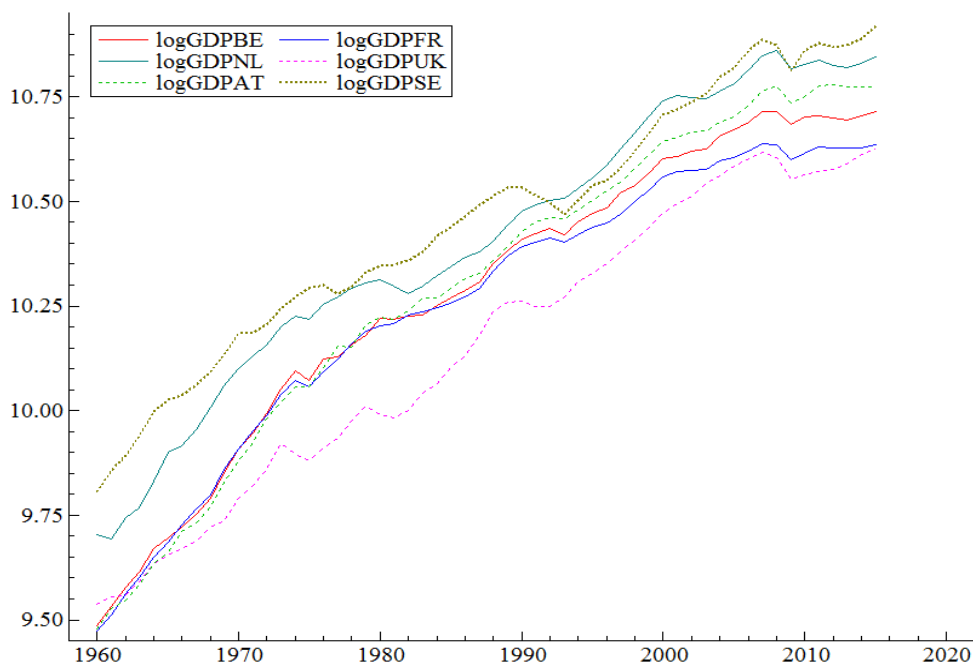
## 6.2 Testaus ja tulokset, bruttokansantuote

Tutkimusaineisto bruttokansantuotteen ja energiamuuttujien osalta esitetään kuvioissa 11-13. Graafisesti tarkasteltuna voidaan huomata, että bruttokansantuotteen kehityksellä tarkasteltavissa maissa on selkeä yhteys. Sen sijaan energiankulutuksen kehitys maissa vaihtelee huomattavasti tarkasteltavana ajanjaksona. Energian-, ja sähkönkulutus tarkasteltavissa maissa on kasvanut lukuun ottamatta Iso-Britanniaa, jossa kokonaisenergiankulutus on laskenut sitten vuoden 1960. Iso-Britannian sähkönkulutuksen trendi eroaa myös muista maista korkeamman lähtöpisteen vuoksi. Sähkönkulutus Iso-Britanniassa on myös alemmalla tasolla verrattuna muihin tarkasteltaviin maihin.

Graafisesti tarkasteltuna bruttokansantuotteen kasvun osalta on vaikea sanoa, onko kehityksessä tapahtunut rakenteellista muutosta. Iso-Britanniaa lukuun ottamatta tarkasteltavien maiden energiankulutuksessa vaikuttaisi olevan rakenteellinen muutos vuoden 1980 jälkeen. Iso-Britanniassa energiankulutus on pysynyt suhteellisen vakaana, kun taas muissa maissa energiankulutus kasvoi vuoteen 1980 saakka ja on sen jälkeen pysytellyt suhteellisen samana. Myös sähkönkulutuksen tapauksessa vaikuttaisi aineistossa olevan rakenteellinen muutos noin vuonna 1980. Kaikkien maiden tapauksessa sähkönkulutuksen kasvu loiventui vuoden 1980 jälkeen ja Iso-Britannian tapauksessa vuoden 2014 sähkönkulutus oli lähes sama kuin vuonna 1980.

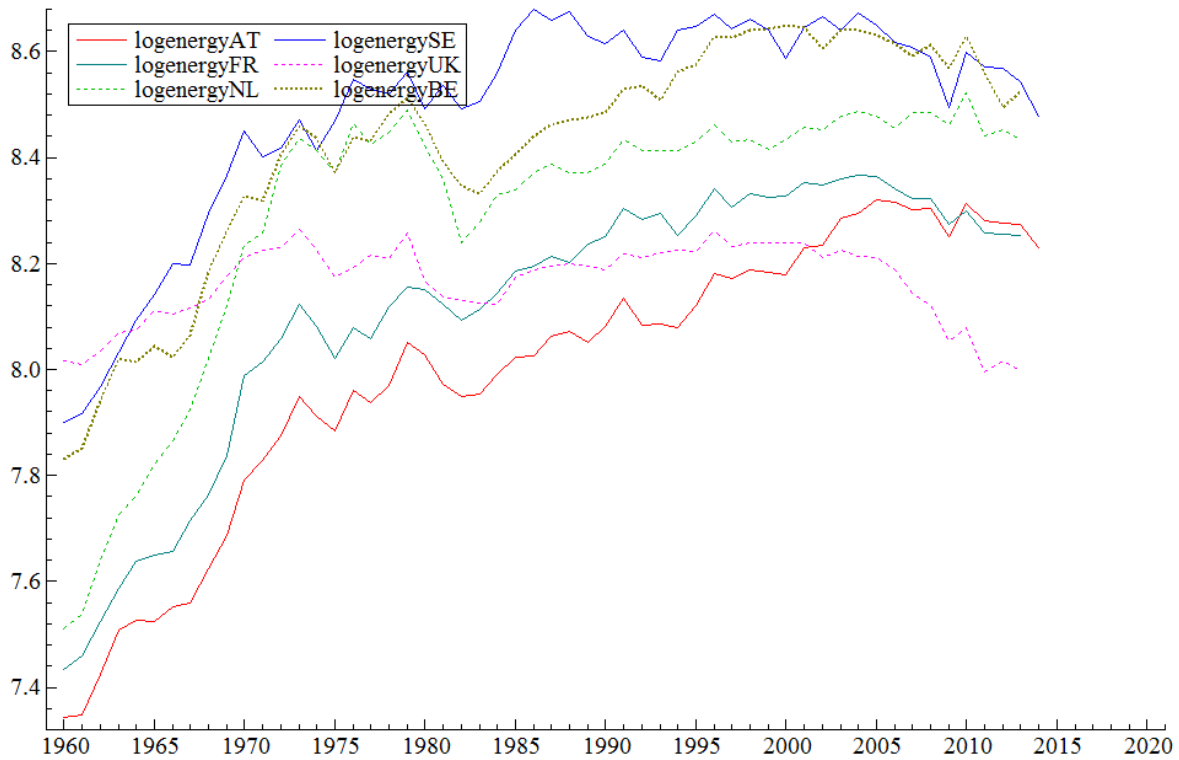
Energiamuuttujien tarkastelun perusteella voidaan sanoa, että aineistossa on mahdollisesti tapahtunut rakenteellinen muutos vuosien 1960-1980 ja vuosien 1981-2014 aineistojen välillä. Sen sijaan bruttokansantuotteen kehityksen osalta rakenteellisen muutoksen olemassaolo on epäselvempää. Rakennemuutokselle on myös teoreettiset perustansa 1970-luvun öljykriiseissä, sekä 1970-luvun korkeissa raaka-aineiden ja energian reaalisisissa hinnoissa, jotka saavuttivat huippunsa vuonna 1980.

Kuvio 11. Bruttokansantuotteen per capita kehitys logaritmoituna vuoden 2010 dollareissa (World Bank).

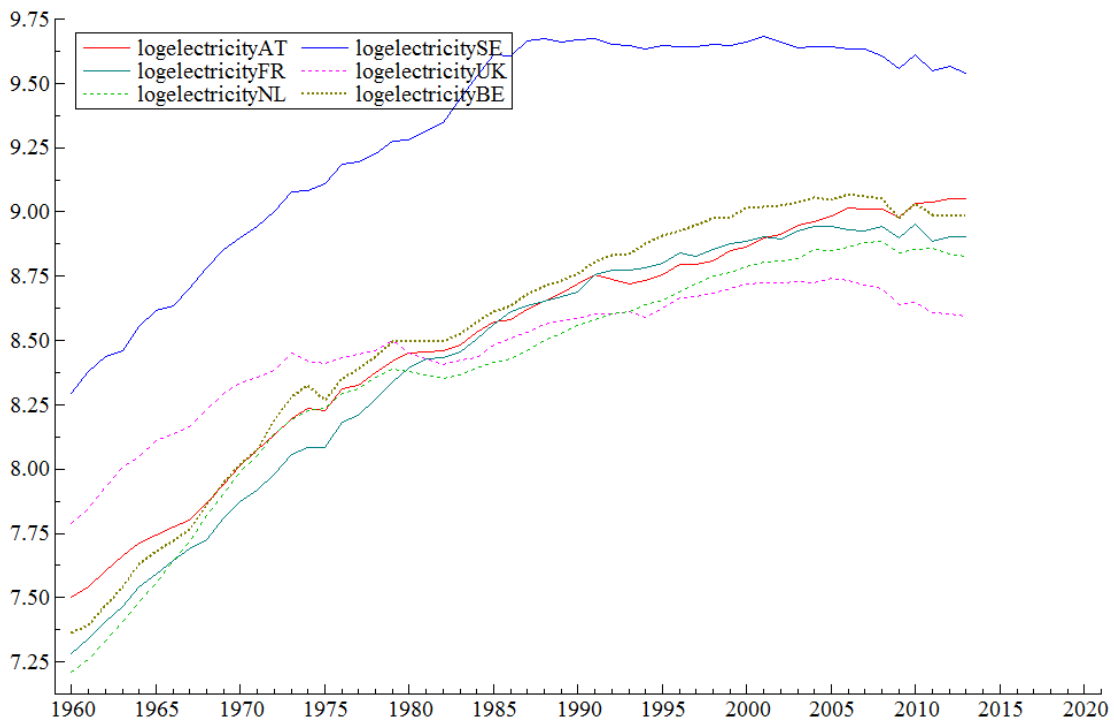




Kuvio 12. Logaritmoitu energiankulutus per capita (World Bank).



Kuvio 13. Logaritmoitu sähkönkulutus per capita (World Bank).



Koska mahdollisesta rakennemuutoksesta vuoden 1980 tienoilla on viitteitä sekä graafisen tarkastelun ja akateemisten tutkimusten, tehdään kunkin maan tapauksessa Chow-testi BKT:n ja energiankulutuksen (BKTen), sekä –sähkönkulutuksen (BKTel) tapauksessa. Tarkasteltavia havaintoja on siis 54 kappaletta ja selittäviä muuttujia yksi. Testisuure noudattaa siis jakaumaa  $F \sim (1, 54 - 2 * 1)$ , jolloin kriittiseksi arvoksi 5 prosentin luottamusvälillä muodostuu 4,00. Testisuureet ovat nähtävissä taulukossa 10.

Taulukko 10. Chow-testisuureet bruttokansantuotteen muutokselle energiankulutuksen, sekä sähkönkulutuksen suhteen. Rakennemuutospisteenä vuosi 1980.

Maa	Chow-testisuure BKTen	Chow-testisuure BKTel
Iso-Britannia (GB)	3.41	89,48*
Ranska (FR)	2.60	37.68*
Alankomaat (NL)	6.81*	15,75*
Belgia (BE)	2.04	10.4*
Itävalta (AT)	5.93*	70,20*
Ruotsi (SE)	4.24*	1,95

\*Tilastollisesti merkitsevä 5 prosentin luottamusvälillä.

Kuten taulukosta 10 voidaan nähdä, kaikkien muiden maiden paitsi Ruotsin kohdalla on havaittavissa rakennemuutos sähkönkulutuksen suhteen vuosien 1960-1980 ja 1981-2015 välisten aineistojen välillä. Alankomaiden, Itävallan ja Ruotsin tapauksessa rakennemuutos on havaittavissa energiankulutuksen tapauksessa. Rakennemuutoksia saattaa olla aineistossa useampiakin, mutta vuoden 1980 tienoilla tapahtuva rakennemuutos on ainoa, jolle on olemassa historialliset perusteet, kuten mainitut poliittiset toimet öljykriisin myötä ja korkeat energian-, sekä raaka-aineiden reaali hinnat läpi 1970-luvun huipentuen vuonna 1980.

Muuttujien stationaarisuutta tarkastellaan seuraavaksi ADF-testillä, jossa on mukana vakiotermi ja enintään kolme viivettä. Malliin on otettu mukaan tilastollisesti merkitsevät viiveet. Mikäli yksikään viive ei ole tilastollisesti merkitsevä, on tarkastelussa käytetty sitä viivettä, joka on lähimpänä tilastollista merkitsevyyttä. Tilastollinen merkitsevyys siis tarkoittaa, että muuttuja on

integroitunut astetta yksi. Tarkastelut on tehty koko aineistolle (1960-2015) (taulukko 11), sekä rakennemuutoksen jälkeiselle aineistolle (1981-) (taulukko 12).

Taulukko 11. ADF-testit muuttujien integroituneisuuden asteen tarkastelemiseksi (1960-2014).

Maa	UK	FR	NL	BE	AT	SE
RealGDP	$>I(1) \ t = -1.54$	$I(1) \ (t = -4.09)^{**}$	$I(1) \ t = -2.73^*$	$I(1) \ t = -3.76^*$	$I(1)^{**} \ t = -5.06)$	$>I(1) \ t = -1.27$
Energy	$>I(1) \ t = -1.84$	$I(1)^{**} \ t = -4.01$	$I(1)^{**} \ t = -4.57$	$I(1)^* \ t = -3.18$	$>I(1) \ t = -2.53$	$I(1)^{**} \ t = -4.14$
Electricity	$I(1)^{**} \ t = -5.17$	$I(1)^{**} \ t = -5.19$	$I(1)^{**} \ t = -4.13$	$I(1)^{**} \ t = -5.75$	$I(1)^{**} \ t = -4.59$	$I(1)^{**} \ t = -3.98$

\*Tilastollisesti merkitsevä 10 prosentin luottamusvälillä

\*\*Tilastollisesti merkitsevä 5 prosentin luottamusvälillä

Taulukko 12. ADF-testit muuttujien integroituneisuuden asteen tarkastelemiseksi (1981-2014).

Maa (1981-2015).	UK	FR	NL	BE	AT	SE
RealGDP	$>I(1) \ t = -1.96$	$>I(1) \ t = -1.66$	$>I(I) \ t = -1.00$	$>I(1) \ t = -1.32$	$>I(1) \ t = -2.17$	$>I(1) \ t = -0.57$
Energy	$>I(1) \ t = -0.53$	$>I(1) \ t = -1.68$	$>I(1) \ t = -1.29$	$>I(1) \ t = -1.31$	$>I(1) \ t = -0.72$	$I(1)^* \ t = -2.84$
Electricity	$>I(1) \ t = -1.86$	$I(1)^{**} \ t = -3.95$	$>I(1) \ t = -1.55$	$>I(1) \ t = -2.07$	$>I(1) \ t = -1.94$	$I(1)^{**} \ t = -3.56$

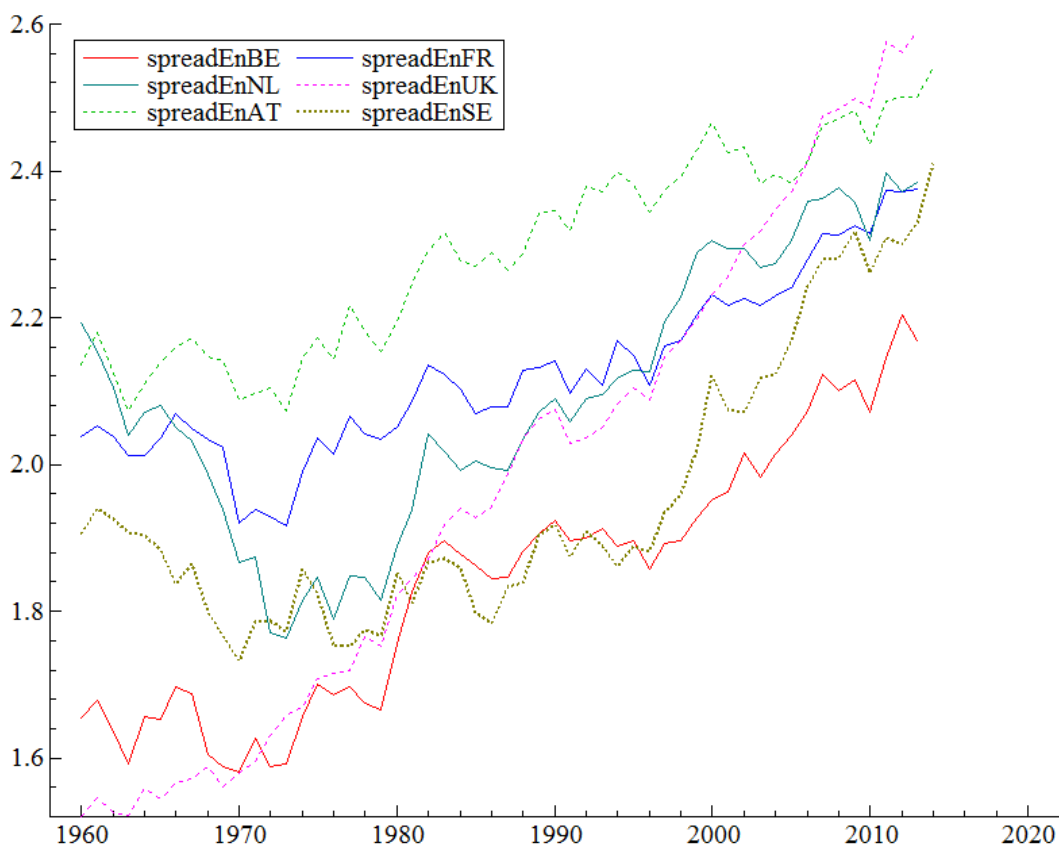
\*Tilastollisesti merkitsevä 10 prosentin luottamusvälillä

\*\*Tilastollisesti merkitsevä 5 prosentin luottamusvälillä

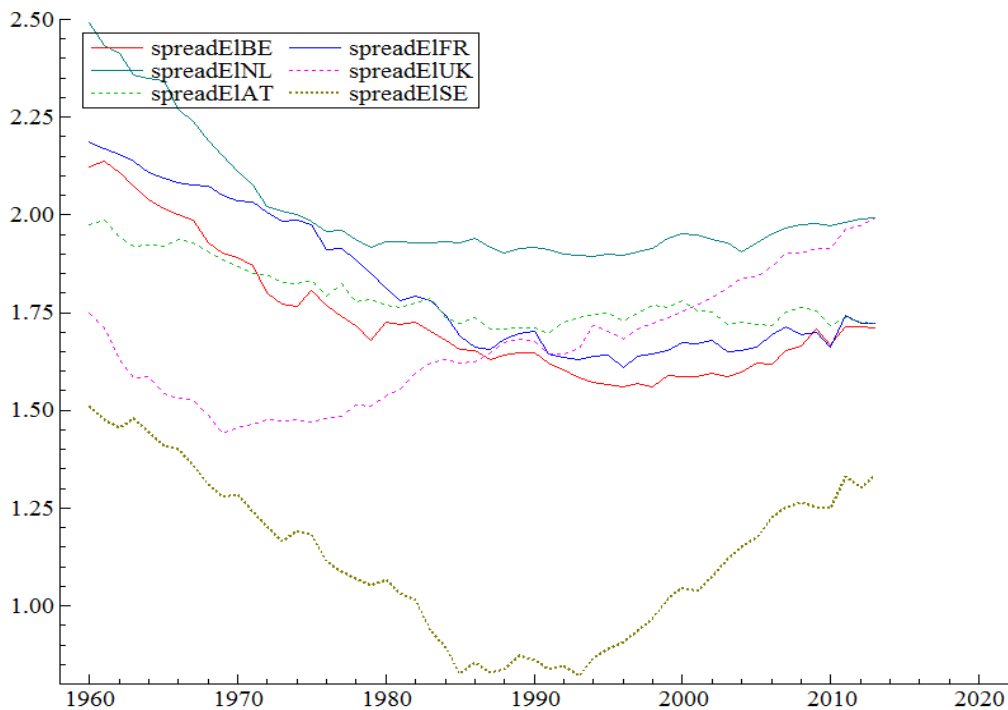
Reaalinen BKT on molemmissa koko aikasarjan huomioon ottavassa taulukossa 11 integroitunut astetta yksi 10 prosentin luottamusvälillä Ranskan, Itävallan ja Belgian kohdalla. Lisäksi sähkönkulutus on integroitunut astetta yksi kaikkien maiden kohdalla. Oletetun rakennemuutoksen jälkeisessä aikasarjassa (taulukko 12) ainoastaan Ruotsin energia-, ja sähkömuuttuja, sekä Ranskan sähkönkulutusmuuttuja ovat integroituneet astetta yksi 10 prosentin luottamusvälillä.

Jotta muuttujilla olisi yhteisintegroiva relaatio, täytyy mainitusti muuttujien tasapainopoikkeamien ja niiden virhetermien olla stationaarisia. Kuvioissa 14-15 on esitelty tasapainopoikkeamat selitettävän muuttujan (bruttokansantuote) sekä selittävien muuttujien (energiankulutus, sähkönkulutus) välillä. Graafisesti tarkasteltuna tasapainorelaatiot eivät vaikuta olevan kummassakaan tapauksessa stationaariset.

Kuvio 14. Reaalisen BKT:n ja energiankulutuksen välinen tasapainopoikkeama. (World Bank)



Kuvio 15. Reaalisen BKT:n ja sähkönkulutuksen tasapainopoikkeama. (World Bank)



Taulukko 13. ADF-testit muuttujien välisen tasapainorelaation stationaarisuuden tarkastelemiseksi (1981-2014).

Maa (1981-2015).	UK	FR	NL	BE	AT	SE
GDPE <sub>n</sub>	0.00 t= 0.26	0.00 t= (-0.04)	-0.06 t= (-1.48)	-0.03 t= (-0.67)	-0.19 t= (-1.76)	0.05 t= 0.99
GDPE <sub>l</sub>	0.01 t= 0.42	-0.27 t= (-3.23)*	-0.07 t= (-0.93)	-0.11 t= (-1.77)	-0.37 t= (-2.37)	-0.01 t= (-0.32)

\*Tilastollisesti merkitsevä 10 prosentin luottamusvälillä

\*\*Tilastollisesti merkitsevä 5 prosentin luottamusvälillä

Tutkittaessa muuttujien tasapainorelaatioita (taulukko 13) huomataan, että ainoastaan Ranskan kohdalla saadaan 10 prosentin luottamusvälillä tilastollisesti merkitsevä tulos bruttokansantuotteen ja sähkönkulutuksen välille. ADF-testi varmentaa siis graafisen tarkastelun tulokset, eli bruttokansantuotteen ja energiamuuttujien välillä ei ole tilastollisesti merkitsevää yhteyttä

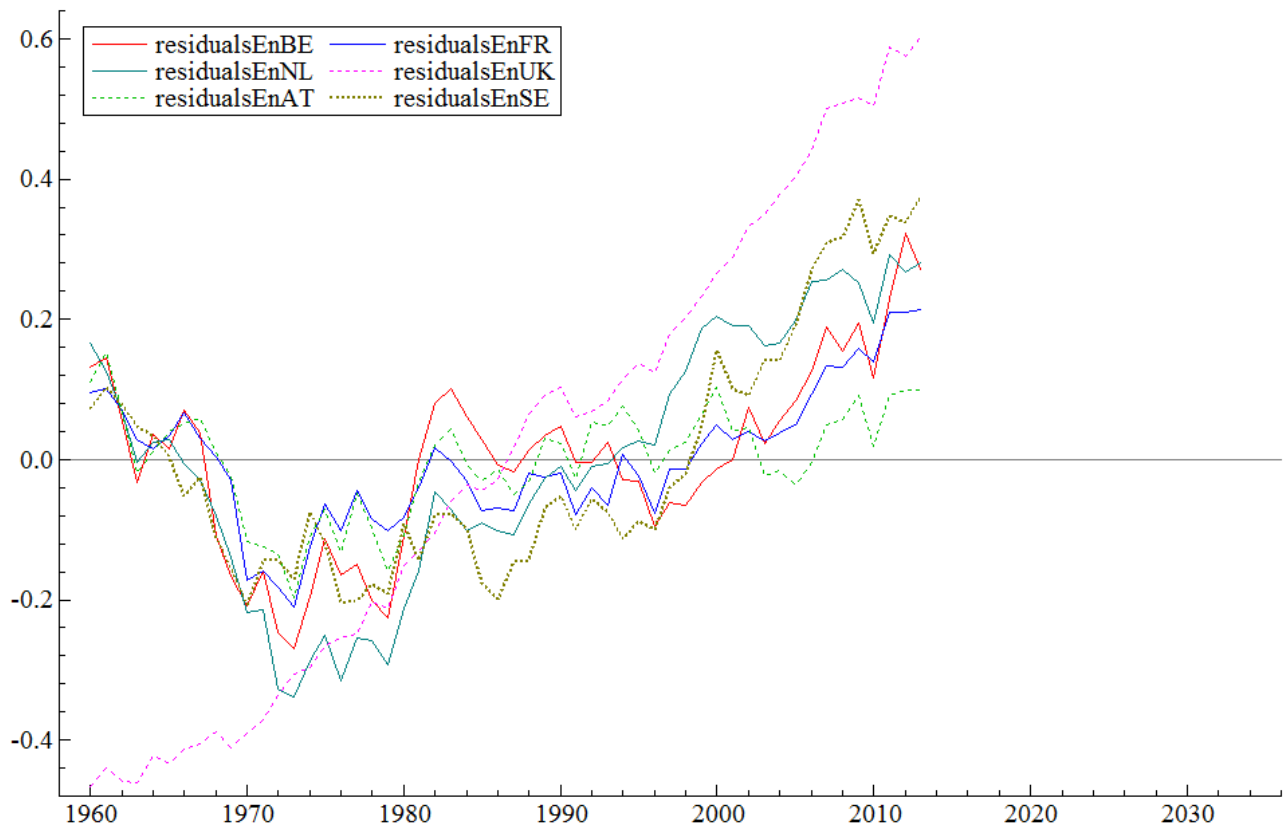
rakennemuutoksien vuosien 1981-2014 välisenä aikana. Jatketaan silti jäännöstermien stationaarisuuden tarkasteluun, jotta voidaan lopullisesti varmistaa tulokset.

Kuvioissa 16-17 esitetään bruttokansantuotteen ja energian-, sekä sähkönkulutuksen virhetermien kehitys aikasarjan aikana. Virhetermit on siis otettu mallista:

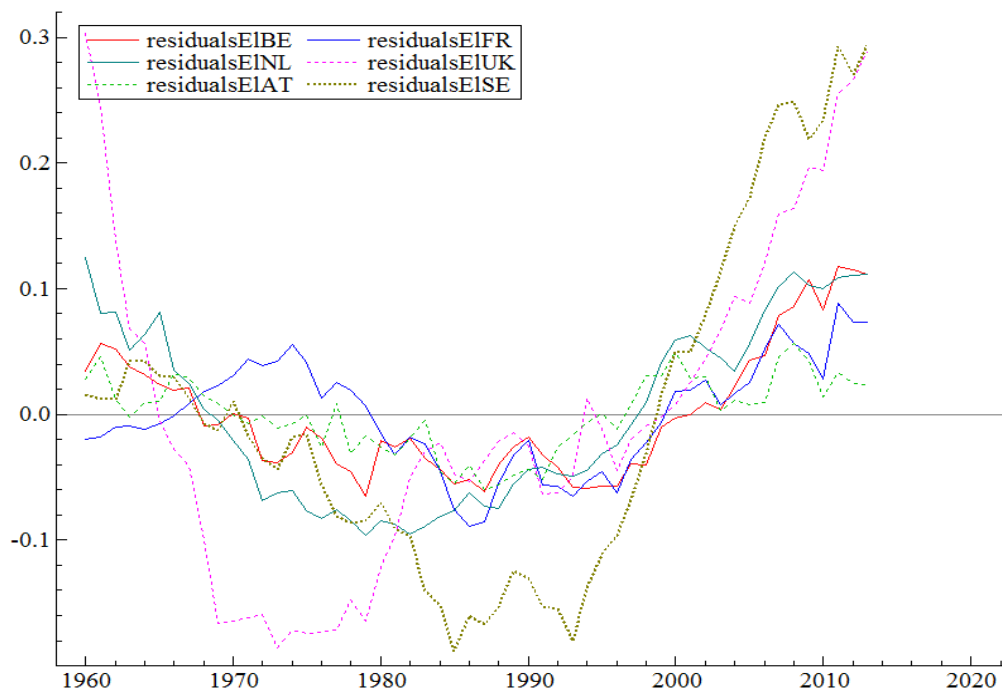
$$Y_t = a + \beta X_{it} + \varepsilon_t \quad (37)$$

Missä  $Y$  = bruttokansantuote,  $a$  = vakiotermi,  $X_i$  = kokonaisenergiankulutus, kokonaissähkönkulutus,  $\varepsilon_t$  = virhetermi. Kuten kuvista voidaan huomata, virhetermit eivät kummankaan selittävän muuttujan tapauksessa vaikuta olevan stationaarisia koko aikasarjan aikana. Stationaarisuus ei myöskään vaikuta toteutuvan vuoden 1980 jälkeisenä periodina. Graafisesti tarkasteltuna vaikuttaa siis, että tarkasteltavissa maissa bruttokansantuotteen taso ei ole yhteisintegroitunut energian-, tai sähkönkulutuksen kanssa. Kuvioissa 16-17 termi El viittaa siis sähkönkulutukseen ja termi En kokonaisenergiankulutukseen.

Kuvio 16. BKT:n ja energiankulutuksen suhteen virhetermit maittain.



Kuvio 17. BKT:n ja sähkönkulutuksen suhteen virhetermit maittain.



Jotta graafisen tarkastelun tulokset voidaan varmistaa, tarkastellaan virhetermien (kuviot 16-17) stationaarisuutta Engle-Granger –testillä rakennemuutoksen jälkeiselle aineistolle (taulukko 13). Viiveiden valintaperusteet ovat samat kuin taulukkojen 11-12 ADF-testien tapauksessa.

Taulukko 13. Engle-Granger-testin tulokset energialle ja BKT:n tasapainorelaation jäännöstermille (BKTen), sekä sähkönkulutuksen ja BKT:n (BKTel) tasapainorelaation jäännöstermille vuosien 1981-2014 välillä. Taulukossa ilmoitettuna regressiokertoimet, sekä t-arvot.

Maa/muuttuja	FR	UK	NL	BE	AT	SE
BKTen	0.01 t=0.06	0.00 t=0.05	-0.06 t=(- 1.53)	0.812 t=0.42	-0.50 t=(- 3.51)**	0.015 t=0.30
BKTel	-0.00 t=(- 0.05)	0.05 t=(- 1.12)	-0.01 t=(- 0.43)	-0.01 t=(- 0.156)	-0.11 t=(- 1.12)	0.02 t=0.694

\*Tilastollisesti merkitsevä 10 prosentin luottamusvälillä

\*\*Tilastollisesti merkitsevä 5 prosentin luottamusvälillä

Graafisesti tarkasteltuna yhteisintegroituneisuus ei näytä toteutuvan koko aineistossa tai vuoden 1980 jälkeisessä aineistossa. Jäännöstermien kohdalla 2000-luvun alkupuolelta lähtien BKT:n kasvu alkaa eriytyä kuvioissa 19-20 sekä energian-, että sähkönkulutuksesta. Kuten taulukosta 13 voidaan nähdä, mallin jäännöstermit vuoden 1980 jälkeiselle aineistolle ovat yhteisintegroituneita ainoastaan Itävallan bruttokansantuotteen kehityksen ja sähkönkulutuksen kohdalla, mutta tasapainoyhtälön osalta ei saavuteta tilastollista merkitsevyyttä, joten tulos saattaa olla tilastollinen sattuma. Voidaan siis sanoa, että bruttokansantuotteen kasvu ei ole yhteisintegroitunut energiankulutuksen tai sähkönkulutuksen kanssa vuosien 1981-2015 välisenä aikana.

Tulosten perusteella siis vaikuttaa, ettei energian-, ja sähkönkulutuksen, sekä BKT:n kehityksen välillä ole yhteisintegroivaa relaatiota. Tämä ei silti tarkoita, että energia olisi taloudessa täysin yhdentekevää. Voi esimerkiksi olla, että energiaa hyödyntävien tuotantovälineiden hyötysuhteiden nousu ja mahdollinen kotitalouslaitteiden hyötysuhteiden nousu on vähentänyt kokonaisenergian-,



ja sähkönkulutuksen tarvetta, vaikka hyödynnetyn exergian määrä olisikin kasvanut tai pysynyt samana.

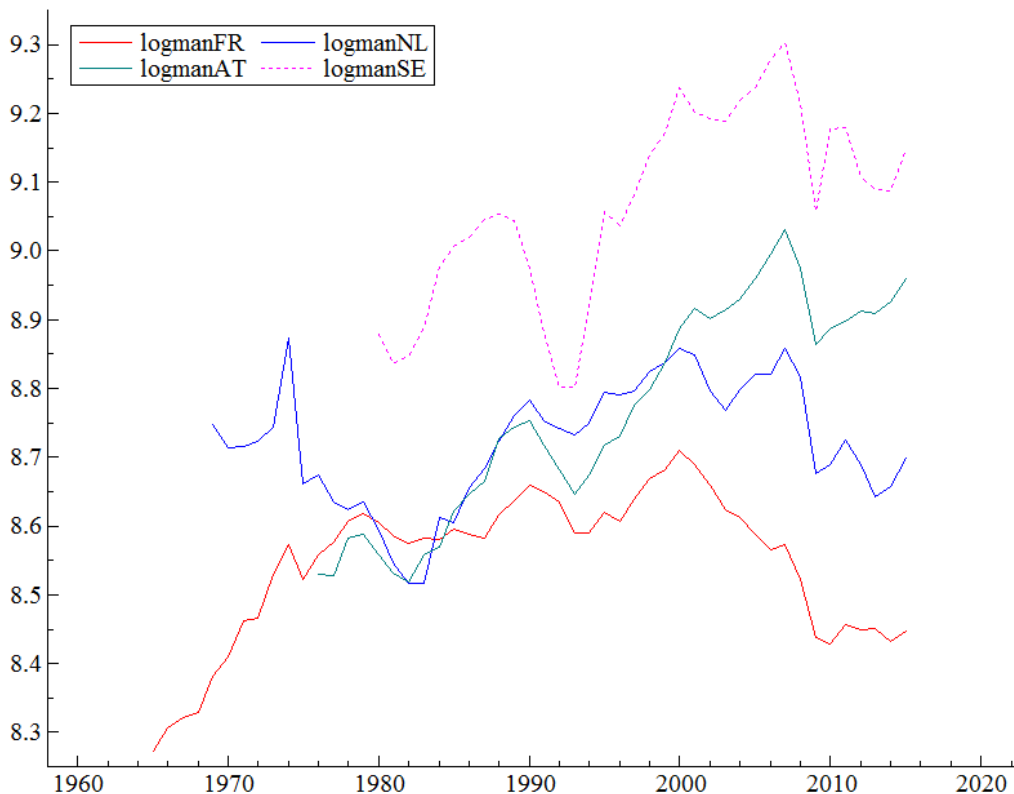
Mikäli bruttokansantuotteiden ja energiamuuttujien tasapainorelaatiot ja jäännöstermit rakennemuutoksen jälkeisessä aikasarjassa olisivat stationaarisia, olisi seuraava askel tehdä jäännöstermeille CRDW-testi, sekä muodostaa muuttujille virheenkorjausmalli. Koska testauksessa ei kuitenkaan löydetty merkittäviä viitteitä yhteisintegroituneisuudesta, ei virheenkorjausmallin muodostamisesta ole mitään hyötyä.

### 6.3 Testaus ja tulokset, teollisuustuotanto

Teollisuudella ja energian-, tai sähkönkulutuksella luulisi olevan jonkinlainen kausaalisuhde. Erityisesti raskasteollisuus, kuten teräksenvalanta tai betoninvalmistus, kuluttavat paljon energiaa. Myös teollisuuden tuotantolaitteet tarvitsevat useimmissa tapauksissa jonkinlaisen energianlähteen. Mikäli bruttokansantuotteella ja energiankulutuksella siis on jonkinlainen yhteys, olettaisi sen löytyvän teollisuustuotannosta.

Tätä suhdetta tarkastellaan samalla tavalla kuin koko bruttokansantuotteen tapauksessa. Nyt vain tarkastellaan energian-, ja sähkönkulutusta, sekä sitä bruttokansantuotteen dollarimääräistä osaa, joka tulee teollisuustuotannosta. Kuviossa 18 esitellään eri maiden teollisuustuotannon määrä dollareissa per capita. Huomionarvoista on, että data on teollisuustuotannon osalta selvästi vajavaisempaa kuin muiden muuttujien kohdalla. Tämä takia jätetään tarkastelusta pois Belgia ja Iso-Britannia, joiden kohdalla datan vähäisyys luultavasti haittaisi luotettavien tulosten saamista. Aikasarjassa tarkasteltavien maiden teollisuustuotannon reaalin arvo on aineiston mukaan laskenut Alankomaiden tapauksessa ja muiden maiden kohdalla kasvanut. Ranskan kohdalla aineistoa on saatavilla vuosilta 1965-2015, Alankomailla 1969-2015, Itävallalla 1980-2015 ja Ruotsilla 1984-2015.

Kuvio 18. Logaritmimuodossa oleva teollisuustuotannon arvo per capita vuoden 2010 dollareissa. Aikasarjan pituus riippuu saatavilla olevasta aineistosta (World Bank).



Taulukossa 14 on suoritettu ADF-testit logaritmoiduille teollisuustuotannon arvoille, tarkoituksena tarkastella teollisuustuotantodatan integroituneisuuden astetta. Viivepituutena käytetään enintään kolmea viivettä, joista tilastollisesti merkitsevät viiveet 10 prosentin luottamusvälillä ovat mukana. Mikäli yksikään viive ei ole tilastollisesti merkitsevä, käytetään sitä, mikä on lähimpänä tilastollista merkitsevyyttä. Termi GDPman viittaa teollisen tuotannon osuuteen BKT:sta (ei siis prosentuaaliseen, vaan dollarimääräiseen). Tuloksissa yksikään muuttuja ei ole stationaarinen tai integroitunut astetta yksi kummassakaan aikasarjassa.

Taulukko 14. ADF-testi teollisuustuotannon integroituneisuuden asteelle. Regressiokertoimet ja t-arvot.

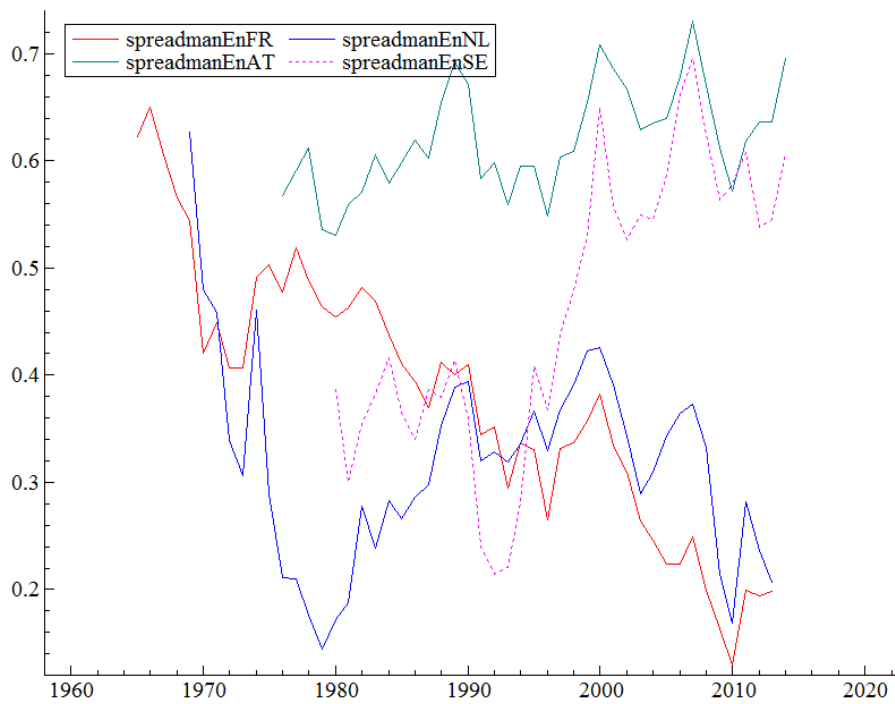
Muuttuja	GDPmanFR(1965-2015)	GDPmanNL (1969-2015)	GDPmanAT (1980-2015)	GDPmanSE (1984-2015)
Koko aineisto	-0.09 t=(-2.29)	-0.16 t=(-1.73)		
Vuodet 1981-2015. Ruotsi 1984-2015	-0.06 t=(-1.02)	-0.14 t=(-2.03)	-0.05 t=(-1.35)	-0.18 t=(-2.13)

Ilmoitetut arvot t-arvoja

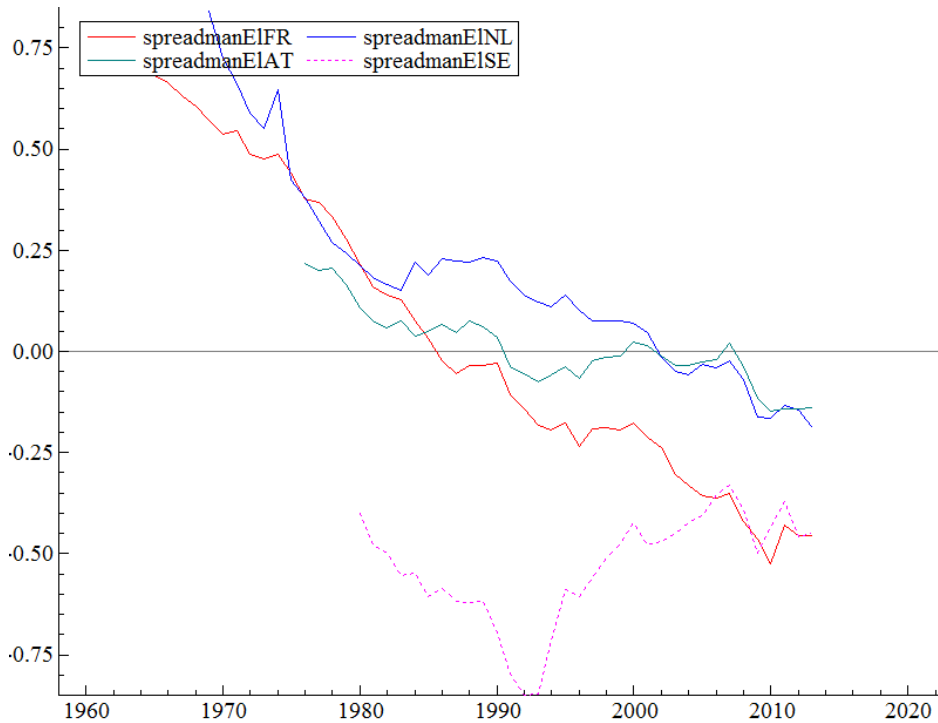
\*Tilastollisesti merkitsevä 10 prosentin luottamusvälillä

Kuvista 19-20 graafisella tarkastelulla huomataan, että selitettävän muuttujan (teollisuustuotanto) ja selittävien muuttujien (energian-, sähkönkulutus) logaritmien erotus, eli teollisuustuotannon ja energiamuuttujien välinen tasapainorelaatio, ei vaikuta olevan minkään maan kohdalla stationaarinen. Koska tasapainorelaation arvot saadaan kaavan (28) mukaisesti, negatiivinen arvo tarkoittaa tässä, että teollisuustuotannon arvo on pudonnut sähkönkulutusta nopeammin ja päinvastoin.

Kuvio 19. Logaritmoidun teollisuustuotannon ja energiankulutuksen tasapainorelaatio.



Kuvio 20. Logaritmoidun teollisuustuotannon ja sähkönkulutuksen tasapainorelaatio.



Taulukko 15. ADF-testi tasapainorelaatioille (1981-2015). Manen=energian ja teollisuustuotannon tasapainorelaatio, manel=sähkön ja teollisuustuotannon tasapainorelaatio. Regressiokertoimet ja t-arvot.

Maa/tasapainorelaatio	FR(Ranska)	NL(Alankomaat)	AT(Itävalta)	SE(Ruotsi)
Manen	-0,05 t=(-0.86)	-0.22 t=(-1.83)	-0.42 t=(-3.25)*	-0.10 t=(-1.25)
Manel	-0.06 t=(-1.83)	0.03 t=0.56	-0.10 t=(-1.39)	-0.11 t=(-1.46)

\*Tilastollisesti merkitsevä 10 prosentin luottamusvälillä.

Taulukosta 15 huomataan, että ainoastaan Itävallan energiankulutuksen ja teollisuustuotannon välinen tasapainorelaatio on stationaarinen 10 prosentin luottamusvälillä. Muiden maiden kohdalla voidaan todeta, että energian-, tai sähkönkulutuksen kehitykset eivät todennäköisesti ole yhteisintegroituneet. Tälle saattaa olla selityksenä raskaan teollisuuden siirtyminen tarkasteltavien maiden ulkopuolelle, tai tuotantomenetelmien hyötysuhteen parantuminen. Koska teollisuustuotannon arvo on pienentynyt tarkasteltavalla aikavälillä saattaa energiankulutus olla siirtynyt yhä enemmän esimerkiksi palvelusektorille.

Taulukossa 16 tehdään vielä Engle-Granger –testi muuttujille eri maiden kohdalla. Koska Itävallan kohdalla saadaan tilastollisesti merkitsevä tulos energiantuotannon kohdalla, voidaan jatkaa CRDW-testaukseen, sekä virheenkorjausmallin muodostamiseen Itävallan kohdalla.

Huomionarvoista on, että ADF-testin mukaan Itävallan teollisuustuotannon kehitys ei ollut tilastollisesti merkitsevästi integroitunut astetta yksi, joten tuloksiin tulee suhtautua skeptisesti. DW-testin tulokseksi Itävallan ja energiankulutuksen tasapainorelaation jäännöstermille saadaan 2.05, mikä ei eroa tilastollisesti merkitsevästi ihannearvosta 2. Relaation jäännöstermi ei siis todennäköisesti ole autokorreloitunut.

Taulukko 16. Engle-Granger-testin tulokset energialle ja teollisuustuotannon tasapainorelaation jäännöstermille (Manen), sekä sähkönkulutuksen ja teollisuustuotannon (Manel) tasapainorelaation jäännöstermille vuosien 1981-2014 välillä. Regressiokertoimet, sekä t-arvot.

Maa/muuttuja	FR	NL	AT	SE
Manen	-0.05 t=(- 0.87)	-0.22 t=(- 1.83)	-0.43 t=(- 3.25)*	-0.10 t=(- 1.25)
Manel	-0.06 t=(- 1.85)	0.03 t=0.56	-0.11 t=(- 1.39)	-0.11 t=(- 1.46)

\*Tilastollisesti merkitsevä 10 prosentin luottamusvälillä

Lopuksi muodostetaan virheenkorjausmalli Itävallan teollisuustuotannon ja energiankulutuksen välille kaavan (35) mukaan:

Maa/muuttuja	Itävalta
Manen	$\Delta Y_t = 0.26 - 0.02\Delta X_{t-1} - 0.17*[Y_{t-1} - \beta X_{t-1}] + \varepsilon_t$

\*tilastollisesti merkitsevä 10 prosentin luottamusvälillä

Historialliseen aineistoon perustuvan mallin mukaan siis teollisuustuotannon muutos riippuisi negatiivisesti edellisperiodin energiankulutuksen muutoksesta, sekä edellisen periodin tasapainopoikkeama tasapainottuisi seuraavalle periodille kertoimella -0.17. Malli on vain teoreettinen, sillä edelleenkin Itävallan teollisuustuotantoa ei voitu määritellä integroituneeksi astetta yksi ja ainoastaan virheenkorjaustermi on tilastollisesti merkitsevä 10 prosentin luottamusvälillä. Kaiken kaikkiaan testauksesta ei löydetä vahvoja merkkejä yhteisintegroituneisuudesta muuttujien välillä, eikä odotettua yhteisintegroituneisuutta sähkönkulutuksen ja teollisuustuotannon välillä. Voidaan siis todeta, ettei energian-, tai sähkönkulutuksen ja teollisuustuotannon arvon välillä ole ainakaan merkittävää yhteisintegroivaa relaatiota.

## 7. Johtopäätökset

Tutkimus on käynyt läpi energian merkitystä taloudessa, makrotalousmalleissa ja ympäristötaloustieteen malleissa. Läpi käydyn aineiston perusteella on todennäköistä, että energiaa ei todennäköisesti ole otettu tarpeeksi huomioon perinteisissä makromalleissa. Tämä on kuitenkin muuttunut, kun ympäristöongelmat, kuten ilmastonmuutos ja huoli uusiutumattomien luonnonvarojen ehtymisestä on saanut jalansijaa yhteiskunnallisessa keskustelussa. Energialla vaikuttaisi olevan tärkeä rooli taloudellisessa toimeliaisuudessa ja väitetty energiankulutuksen ja bruttokansantuotteen kasvun eriytyminen saattaa osin johtua energiantuotannon ja –hyödyntämisen hyötysuhteen kasvusta. On kuitenkin ymmärrettävää, että perinteiset makromallit eivät ole juurikaan ottaneet energiaa mukaan tarkasteluun, sillä tähän saakka maailmantalous ei ole kokenut merkittäviä, pitkäaikaisia energian tuotantoshokkeja vuoden 1973 öljykriisiä lukuun ottamatta.

Tarkastelemalla energiankulutuksen ja BKT:n kehityksen historiallista suhdetta on helppo huomata, että energian hyödyntämisen aloittaminen aluksi hiilen ja sittemmin muiden energianlähteiden hyödyntämisen kautta muutti talouden rakennetta Euroopassa. Malthusin mallissa esitelty käänteinen suhde väestömäärän ja reaali-palkkojen välillä, sekä suhde väestömäärän ja maanvuokrien välillä murtui teollisen vallankumouksen myötä. Muiden energianlähteiden kuin puun ja biomassan hyödyntäminen yhdessä ensimmäisten koneiden kanssa mahdollisti sen, että tuotanto ei enää ollut sidottuna maa-alaan.

Kun tarkastellaan energian, pääoman ja työvoiman suhdetta on huomattavissa selkeitä eroja ympäristötaloustieteilijöiden ja muiden taloustieteilijöiden kesken. Läpi käydyn aineiston perusteella on selkeää, että energia ei voi olla täydellinen substituuksi pääomalle tai työvoimalle, vaan pikemminkin komplementti. Pitkällä aikavälillä näitä kolmea tuotannontekijää voidaan substituoida, mutta vain tiettyyn pisteeseen saakka. Energiakriisit voivat myös aiheuttaa meno-osuuttaan selkeästi suuremman negatiivisen vaikutuksen bruttokansantuotteeseen, mikä rikkoo esimerkiksi Solowin mallin oletuksia. Nähtäväksi jää myös, jatkuuko energiaa hyödyntävän pääoman hyötysuhteen kasvu ja sitä kautta energian ja bruttokansantuotteen määrän eriytyminen tulevaisuudessa.

Tarkastelemalla empiirisiä tutkimuksia ei onnistuttu muodostamaan yhdenmukaista kausaalisuhdetta tai sen suuntaa energiankulutukselle ja bruttokansantuotteen tasolle. Eroavaisuudet eivät johdu esimerkiksi maiden kehittyneisyyden asteesta, maantieteellisestä sijainnista tai teollisuuden rakenteesta, vaan kullakin maaryhmällä on eroavaisuuksia energiankulutuksen ja bruttokansantuotteen kausaalisuhteessa. Huomionarvoista on, että tieteellisissä tutkimuksissa mahdollisten rakenteellisten muutosten huomioon ottaminen aikasarja-aineistossa on jäänyt vähälle, mikä saattaa vääristää tuloksia.

Empiirisessä osuudessa ei saatu luotua kausaalisuhdetta yhteisintegroituneisuuden muodossa tarkasteltavien maiden, sekä energian-, tai sähkönkulutuksen välille vuoden 1980 jälkeisessä aineistossa. Myöskään teollisuustuotannon ja energiamuuttujien välille ei onnistuttu löytämään yhteyttä. Teollisuustuotannon tarkastelun ja energiamuuttujien suhteen tutkimista haittaavat mainitusti globalisoituminen, sekä teollisuustuotannon osuuden pienentyminen koko bruttokansantuotteesta.

Tästä huolimatta politiikkasuosituksena aineistoon ja empiiriseen osaan perustuen voi todeta, että esimerkiksi poliittisesti toimeenpannut energiansäästötoimet eivät todennäköisesti vaikuta merkittävästi bruttokansantuotteeseen ja niitä tulisi ajaa läpi, jotta mahdollisten energian tuotantoshokkien ja energian tuonnin negatiiviset kauppataasevaikutukset saataisiin minimoitua. Koska energiankulutuksen ja bruttokansantuotteen välisen suhteen heikentyminen saattaa kuitenkin johtua useasta eri seikasta, kuten raskaan teollisuuden siirtymisestä kehittyviin maihin, olisi energiankulutuksen ja bruttokansantuotteen kehityksen suhdetta tarkasteltava globaalissa mittakaavassa, jotta tutkimuskysymykselle saataisiin ”oikea” vastaus.



- Adams P. D. 2005. Interpretation of results from CGE models such as GTAP. *Journal of Policy Modeling* 27: 941-959.
- Aghion, P., and P. Howitt. 2009. The Economics of Growth. *MIT Press. Cambridge, MA.*
- Ayres, R.U., and A.V. Kneese. 1969. Production, consumption and externalities. *American Economic Review* 59: 282-297.
- Ayres, R.U., L.W. Ayres, B. Warr. 2003. Exergy, power and work in the US economy 1900-1998. *Energy* 28: 219-273.
- Ayres, R.U., B. Warr. 2009. The Economic Growth Engine. *Edward Elgar Publishing Ltd. Cheltenham, United Kingdom.*
- Beckman, J., T. Hertel, W. Tyner. 2011. Validating energy-oriented CGE-models. *Energy Economics* 33: 799-806.
- Berkhout, P. H. G., J. C. Muskens, and J. W. Velthuisen. 2000. Defining the rebound effect. *Energy Policy* 28: 425-432.
- Bresnahan, T.F., M. Trajtenberg. 1995. General purpose technologies 'Engines of Growth'?. *Journal of Econometrics* 65: 83-108.
- Burbridge, J. and A. Harrison. 1984. Testing for the effects of oil price rises using vector autoregressions. *International Economic Review* 25: 459-484.
- Cashin, P., C.J. McDermott, A. Scott. 2002. Booms and Slumps in world commodity prices. *Journal of Development Economics* 69: 277-296.
- Cleveland, C.J., R.K. Kaufmann, D.I Stern. 2000. Aggregation and the role of energy in the economy. *Ecological Economics* 32: 301-317.

Costanza, R. and H. E. Daly. 1992. Natural capital and sustainable development. *Conservation Biology* 6: 37-46.

Durlauf, S. N., P. A. Johnson, J. R. W. Temple. 2005. Growth econometrics. In *Handbook of Economic Growth*. P. Aghion and S. N. Durlauf, Eds.: Volume 1A, 555-677. North Holland, Amsterdam.

Faisal, J., A. Eatzaz. 2010. The relationship between electricity consumption, electricity prices and GDP in Pakistan. *Energy Policy*, Vol. 38, No. 10, 6016–6025.

Fisher, R. A., F. Yates. 1974. Statistical Tables for Biological, Agricultural and Medical Research, *Longman Group Ltd., London*.

Gillingham, K., R. G. Newell, K. Palmer. 2009. Energy efficiency economics and policy. *Annual Review of Resource Economics* 1: 597-620.

Greene, W. H. 2000. Econometric Analysis, International Edition. *Pearson Education Limited*. Vol. 7. New York

Georgescu-Roegen, N. 1975. Energy and Economic Myths. *Southern Economic Journal* Vol. 41(3): 347-381.

Hall, C. A. S., C. J. Cleveland, and R. K. Kaufmann. 1986. *Energy and Resource Quality: The Ecology of the Economic Process*. Wiley Interscience. New York.

Hansen, G. D. and E. C. Prescott. 2002. Malthus to Solow. *American Economic Review* 92(4): 1205-1217.

Kander, A. 2002. *Economic Growth, Energy Consumption and CO2 Emissions in Sweden 1800-2000*, *Lund Studies in Economic History* No. 19. Lund.

Kaufmann, R. K. 1992. A biophysical analysis of the energy/real GDP ratio: implications for substitution and technical change. *Ecological Economics*, Vol. 6(1): 35-56

Koetse, M. J., H. L. F. de Groot, R. J. G. M. Florax. 2008. Capital-energy substitution and shifts in factor demand: A meta-analysis. *Energy Economics* Vol. 30: 2236–2251.

Koop, G. 2008. *Introduction to Econometrics*, John Wiley & Sons Ltd, New York

Kümmel, R., W. Strassl., A. Gossner., W. Eicchorh. 1985. Technical progress and energy dependent production functions. *Zeitschrift Für Nationaleconomie* Vol 45(3): 285-311

Linares, P., X. Labandeira. 2010. Energy efficiency: Economics and policy. *Journal of Economic Surveys* 24(3): 583-592.

Matisoff, D. C. 2008. The Adoption of State Climate Change Policies and Renewable Portfolio Standards: Regional Diffusion or Internal Determinants. *Review of Policy Research* Vol. 25(6):527-546.

Maddison, A. 2001. *The World Economy: A Millennial Perspective*. OECD, Paris.

McKinnon, J.G. 2010. Critical Values for Cointegration Tests, Queen's Economics Department Working Paper No. 1227, Kingston, Ontario, Canada.

Murphy, D. J. and C. A. S. Hall. 2010. Year in review – EROI or energy return on (energy) invested. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1185: 102-118.

Ozturk, I., A. Aslan, H. Kalyoncu. 2010. Energy consumption and economic growth relationship: evidence from panel data for low and middle income countries. *Energy Policy* 38: 4422-4428.

Payne, J. E. 2010. A survey of the electricity consumption-growth literature, *Applied Energy*, Vol. 87, No. 3, 723-731.

Policonomics, Slutsky's Equation. Retrieved from <http://www.policonomics.com/slutskys-equation/>. Accessed 19<sup>th</sup> April 2017.

Savin, N. E., K. J. White. 1977. The Durbin Watson Test for Serial Correlation with Extreme Sample Sizes or Many Regressors. *Econometrica*, Vol 45, No.8, 1989-1996.

Sharma, S. S. 2010. The relationship between energy and economic growth: Empirical evidence from 66 countries. *Applied Energy*, Vol. 87, No. 11, 3565–3574

Solow, R. M. 1956. A contribution to the theory of economic growth. *Quarterly Journal of Economics*, 70: 65-94.

Solow, R. M. 1974. Intergenerational equity and exhaustible resources. *Review of Economic Studies*, Symposium on the Economics of Exhaustible Resources: 29-46.

Stern, D.I. 2010. The Role of Energy in Economic Growth. *CCEP Working Paper*, The Australian National University.

Stern D. I., Kander A. 2012. The Role of Energy in the Industrial Revolution and Modern Economic Growth. *The Energy Journal*, Vol. 33, No. 3. 125-150.

Stram, D.O., J.W. Lee. 1994. Variance Components Testing in the Longitudinal Mixed Effects Model. *Biometrics* (50): 1171-1177.

Stiglitz, J. E. 1974a. Growth with exhaustible natural resources: efficient and optimal growth paths. *Review of Economic Studies*, Symposium on the Economics of Exhaustible Resources: 123-138.

Smulders, S. 2005. Endogenous technical change, natural resources and growth. In *Scarcity and Growth in the New Millennium*. R. Ayres, D. Simpson, and M. Toman, Eds. *Resources for the Future*. Washington, DC.

The World Bank, World Bank national accounts data, and OECD National Accounts data files. (2015). GDP per capita (constant 2010\$). Retrieved from <http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.KD>

The World Bank, World Bank national accounts data, and OECD National Accounts data files. (2015). Manufacturing, value added (% of GDP). Retrieved from <http://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.MANF.ZS>

The World Bank, IEA Statistics © OECD/IEA. (2014). Energy use (kg of oil equivalent). Retrieved from <http://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.PCAP.KG.OE>

The World Bank, IEA Statistics © OECD/IEA. (2014). Electric power consumption (kWh per capita). Retrieved from <http://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.ELEC.KH.PC>

Wei, C., J. Ni, M. Shen. 2009. Empirical analysis of provincial energy efficiency in China. *China & World Economy* 17(5): 88-103.

Wrigley, E. A. 1988. Continuity, Chance, and Change: The Character of the Industrial Revolution in England. *Cambridge University Press, Cambridge*.

Liite 1. GTAP-mallin talouden tasapainoa kuvaavat yhtälöt (Adams, 2005, 944-945).

Table 1  
A stylised macromodel useful for analysing results from GTAP

Levels equations

$$Y^{\text{MP}}(r) = C(r) + I(r) + G(r) + (X(r) - M(r)) \quad (1)$$

$$Y^{\text{FC}}(r) \times A(r) = F_Y(L(r), K(r)) \quad (2)$$

$$P_{\text{GDP}}^{\text{MP}}(r) \times Y^{\text{MP}}(r) = P_{\text{GDP}}^{\text{FC}}(r) \times Y^{\text{FC}}(r) + P^{\text{TAX}}(r) \times Y^{\text{TAX}}(r) \times T(r) \quad (3)$$

$$P^{\text{C}}(r) \times C(r) = \Omega(r) \times P_{\text{GDP}}^{\text{MP}}(r) \times Y^{\text{MP}}(r) \quad (4)$$

$$P^{\text{G}}(r) \times G(r) = \Gamma(r) \times P_{\text{GDP}}^{\text{MP}}(r) \times Y^{\text{MP}}(r) \quad (5)$$

$$M(r) = F_M \left( Y^{\text{MP}}(r), \text{RER}(r), \frac{1}{1 + T(r)} \right) \quad (6)$$

$$X(r) = F_X(-\text{RER}(r)) \times Y_W(r) \quad (7)$$

$$I(r)/K(r) = \Phi(r) \quad (8)$$

$$\text{RER}(r) = \frac{P_{\text{GDP}}^{\text{MP}}(r)}{\Theta(r) \times P_W(r)} \quad (9)$$

$$P_{\text{GDP}}^{\text{MP}}(r) = F_{P_{\text{GDP}}} (P_{\text{GDP}}^{\text{FC}}(r), T(r), P^{\text{TAX}}(r)) \quad (10)$$

$$\text{TOT}(r) = \frac{1}{F_{\text{TOT}}(X(r)) \times P_W(r)} \quad (11)$$

$$\frac{P^{\text{C}}(r)}{P_{\text{GDP}}^{\text{MP}}(r)} = \frac{1}{F_{P_{\text{C}}}(\text{TOT}(r))} \quad (12)$$

$$\frac{P^{\text{G}}(r)}{P_{\text{GDP}}^{\text{MP}}(r)} = \frac{1}{F_{P_{\text{G}}}(\text{TOT}(r))} \quad (13)$$

$$\frac{K(r)}{L(r)} = F_{\text{KL}} \left( \frac{\text{RP}_L(r)}{\text{RP}_K(r)} \right) \quad (14)$$

$$\text{RP}_L(r)^{S_L(r)} = \frac{\text{RP}_K(r)^{-S_K(r)}}{A(r)} \quad (15)$$

$$\text{RP}_L(r) = \text{RW}(r) \times F_{\text{RP}_L} \left( \frac{1}{\text{TOT}(r), (1 + T(r))} \right) \quad (16)$$

Table 1 (Continued)

Levels equations

$$RP_K(r) = ROR(r) \times F_{RP_K} \left( \frac{1}{TOT(r), (1 + T(r))} \right) \quad (17)$$

Linearised equations in the percentage changes of variables

$$y^{mp}(r) = S_C(r) \times c(r) + S_I \times i(r) + S_G(r) \times g(r) + (S_X(r) \times x(r) - S_M(r) \times m(r)) \quad (1')$$

$$y^{fc}(r) = S_L(r) \times l(r) + S_K(r) \times k(r) - a(r) \quad (2')$$

$$y^{mp}(r) = S_{FC}(r) \times y^{fc}(r) + S_T(r) \times y^{tax}(r) \quad (3')$$

$$c(r) = \omega(r) + (p_{gdp}^{mp}(r) + y^{mp}(r)) - p^c(r) \quad (4')$$

$$g(r) = \gamma(r) + (p_{gdp}^{mp}(r) + y^{mp}(r)) - p^g(r) \quad (5')$$

$$m(r) = y^{mp}(r) + \sigma_M \times (rer(r) - S_T(r) \times t(r)) \quad (6')$$

$$x(r) = \sigma_X(r) \times rer(r) + y_W(r) \quad (7')$$

$$i(r) - k(r) = \phi(r) \quad (8')$$

$$rer(r) = p_{gdp}^{mp}(r) - (\theta(r) + p_W(r)) \quad (9')$$

$$p_{gdp}^{mp}(r) = S_{FC}(r) \times p_{gdp}^{fc}(r) + S_T(r) \times p^{tax}(r) \times t(r) \quad (10')$$

$$tot(r) = \frac{1}{\sigma_X(r)} \times x(r) + f_X(r) - p_W(r) \quad (11')$$

$$p^c(r) = p_{gdp}^{mp}(r) - S_X(r) \times tot(r) \quad (12')$$

$$p^g(r) = p^c(r) + \eta(r) \quad (13')$$

$$k(r) - l(r) = \sigma_{KL}(r) \times (rp_L(r) - rp_K(r)) \quad (14')$$

$$rp_L(r) = \frac{-S_K(r)}{S_L(r)} \times rp_K(r) - a(r) \quad (15')$$

$$rp_L(r) = rw(r) - S_X(r) \times tot(r) + S_T(r) \times t(r) \quad (16')$$

$$rp_K(r) = rot(r) - S_X(r) \times tot(r) + S_T(r) \times t(r) \quad (17')$$

Liite 2. Stern & Kanderin (2010,11) derivaatat ja tuotosten joustot Solowin mallille energiamuuttujalla.

$$\frac{\partial \bar{K}}{\partial s} = \frac{Y}{\delta - s \partial Y / \partial \bar{K}} > 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \bar{K}}{\partial \gamma_E} = \frac{s Y^{1-\phi} \left( (A_E E / \gamma_E)^\phi - (A_L^\beta L^\beta K^{1-\beta} / (1-\gamma_E))^\phi \right)}{\sigma \phi (\delta - s \partial Y / \partial \bar{K})} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \bar{K}}{\partial \phi} = \frac{s Y}{\phi (\delta - s \partial Y / \partial \bar{K})} \left( \frac{\gamma_V (A_L^\beta L^\beta K^{1-\beta} / \gamma_V)^\phi \ln(A_L^\beta L^\beta K^{1-\beta} / \gamma_V) + \gamma_E (A_E E / \gamma_E)^\phi \ln(A_E E / \gamma_E)}{Y^\phi} - \ln Y \right) \quad (12)$$

$$\frac{\partial \bar{K}}{\partial \beta} = \frac{s Y^{1-\phi} (A_L^\beta L^\beta \bar{K}^{1-\beta})^\phi \gamma_V^{1/\sigma} (\ln L - \ln \bar{K})}{\delta - s \partial Y / \partial \bar{K}} \quad (13)$$

$$\frac{\partial \bar{K}}{\partial \delta} = \frac{-\bar{K}}{\delta - s \partial Y / \partial \bar{K}} < 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial \bar{K}}{\partial E} = \frac{s Y^{1-\phi} \gamma_E^{1/\sigma} A_E^\phi E^{\phi-1}}{\delta - s \partial Y / \partial \bar{K}} > 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial \bar{K}}{\partial L} = \frac{s Y^{1-\phi} \beta \gamma_V^{1/\sigma} A_L^\beta L^{\beta\phi-1} \bar{K}^{\phi(1-\beta)}}{\delta - s \partial Y / \partial \bar{K}} > 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial \bar{K}}{\partial A_L} = \frac{s Y^{1-\phi} \beta \gamma_V^{1/\sigma} A_L^{\beta\phi-1} (L^\beta \bar{K}^{(1-\beta)})^\phi}{\delta - s \partial Y / \partial \bar{K}} > 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial \bar{K}}{\partial A_E} = \frac{s Y^{1-\phi} \gamma_E^{1/\sigma} A_E^{\phi-1} E^\phi}{\delta - s \partial Y / \partial \bar{K}} > 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial L} = \beta \gamma_V^{1/\sigma} (A_L^\beta K^{(1-\beta)})^\phi (Y / L^\beta)^{1-\phi} \quad (19)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial E} = \gamma_E^{1/\sigma} A_E^\phi (Y / E)^{1-\phi} \quad (20)$$

The output elasticities of the three inputs are, therefore, given by:

$$\frac{\partial \ln Y}{\partial \ln K} = (1-\beta) \gamma_V^{1/\sigma} \left( (A_L L)^\beta K^{(1-\beta)} / Y \right)^\phi \quad (21)$$

$$\frac{\partial \ln Y}{\partial \ln L} = \beta \gamma_V^{1/\sigma} \left( (A_L L)^\beta K^{(1-\beta)} / Y \right)^\phi \quad (22)$$

$$\frac{\partial \ln Y}{\partial \ln E} = \gamma_E^{1/\sigma} (A_E E / Y)^\phi \quad (23)$$

and GDP is given by:

$$G = Y \left[ \frac{\partial \ln Y}{\partial \ln L} + \frac{\partial \ln Y}{\partial \ln K} \right] = \gamma_V^{1/\sigma} Y^{1-\phi} \left( (A_L L)^\beta K^{(1-\beta)} \right)^\phi \quad (24)$$



**638** CHAPTER 20 ♦ Time-Series Models

**TABLE 20.4** Critical Values for the Dickey–Fuller  $DF_\tau$  Test

	<i>Sample Size</i>			
	<i>25</i>	<i>50</i>	<i>100</i>	$\infty$
<i>F</i> ratio (D–F) <sup>a</sup>	7.24	6.73	6.49	6.25
<i>F</i> ratio (standard)	3.42	3.20	3.10	3.00
AR model <sup>b</sup> (random walk)				
0.01	–2.66	–2.62	–2.60	–2.58
0.025	–2.26	–2.25	–2.24	–2.23
0.05	–1.95	–1.95	–1.95	–1.95
0.10	–1.60	–1.61	–1.61	–1.62
0.975	1.70	1.66	1.64	1.62
AR model with constant (random walk with drift)				
0.01	–3.75	–3.59	–3.50	–3.42
0.025	–3.33	–3.23	–3.17	–3.12
0.05	–2.99	–2.93	–2.90	–2.86
0.10	–2.64	–2.60	–2.58	–2.57
0.975	0.34	0.29	0.26	0.23
AR model with constant and time trend (trend stationary)				
0.01	–4.38	–4.15	–4.04	–3.96
0.025	–3.95	–3.80	–3.69	–3.66
0.05	–3.60	–3.50	–3.45	–3.41
0.10	–3.24	–3.18	–3.15	–3.13
0.975	–0.50	–0.58	–0.62	–0.66

<sup>a</sup>From Dickey and Fuller (1981, p. 1063). Degrees of freedom are 2 and  $T - p - 3$ .

<sup>b</sup>From Fuller (1976, p. 373 and 1996, Table 10.A.2).

CRITICAL VALUES FOR REGRESSION-RESIDUAL BASED  
COINTEGRATION TESTS

Estimated Cointegrating Regression Residual:

$$z_t = y_t - \beta_0 - \beta_1 x_{1t} - \beta_2 x_{2t} - \beta_3 x_{3t} - \dots - \beta_N x_{Nt}$$

Number of Variables $N + 1$	Sample Size	Critical Values		
		10%	5%	1%
2	50	3.28	3.67	4.32
	100	3.03	3.37	4.07
	200	3.02	3.37	4.00
3	50	3.73	4.11	4.84
	100	3.59	3.93	4.45
	200	3.47	3.78	4.35
4	50	4.02	4.35	4.94
	100	3.89	4.22	4.75
	200	3.89	4.18	4.70
5	50	4.42	4.76	5.41
	100	4.26	4.58	5.18
	200	4.18	4.48	5.02
6	500	4.43	4.71	5.28

Liite 5. DW-testin kriittiset arvot (Savin & White, 1977, 1994)

Durbin-Watson Statistic: 5 Per Cent Significance Points of dL and dU																				
n	k*=1		k*=2		k*=3		k*=4		k*=5		k*=6		k*=7		k*=8		k*=9		k*=10	
	dL	dU	dL	dU	dL	dU	dL	dU	dL	dU	dL	dU	dL	dU	dL	dU	dL	dU	dL	dU
6	0.610	1.400	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
7	0.700	1.356	0.467	1.896	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
8	0.763	1.332	0.559	1.777	0.367	2.287	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
9	0.824	1.320	0.629	1.699	0.455	2.128	0.296	2.588	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
10	0.879	1.320	0.697	1.641	0.525	2.016	0.376	2.414	0.243	2.822	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
11	0.927	1.324	0.758	1.604	0.595	1.928	0.444	2.283	0.315	2.645	0.203	3.004	---	---	---	---	---	---	---	---
12	0.971	1.331	0.812	1.579	0.658	1.864	0.512	2.177	0.380	2.506	0.268	2.832	0.171	3.149	---	---	---	---	---	---
13	1.010	1.340	0.861	1.562	0.715	1.816	0.574	2.094	0.444	2.390	0.328	2.692	0.230	2.985	0.147	3.266	---	---	---	---
14	1.045	1.350	0.905	1.551	0.767	1.779	0.632	2.030	0.505	2.296	0.389	2.572	0.286	2.848	0.200	3.111	0.127	3.360	---	---
15	1.077	1.361	0.946	1.543	0.814	1.750	0.685	1.977	0.562	2.220	0.447	2.471	0.343	2.727	0.251	2.979	0.175	3.216	0.111	3.438
16	1.106	1.371	0.982	1.539	0.857	1.728	0.734	1.935	0.615	2.157	0.502	2.388	0.398	2.624	0.304	2.860	0.222	3.090	0.155	3.304
17	1.133	1.381	1.015	1.536	0.897	1.710	0.779	1.900	0.664	2.104	0.554	2.318	0.451	2.537	0.356	2.757	0.272	2.975	0.198	3.184
18	1.158	1.391	1.046	1.535	0.933	1.696	0.820	1.872	0.710	2.060	0.603	2.258	0.502	2.461	0.407	2.668	0.321	2.873	0.244	3.073
19	1.180	1.401	1.074	1.536	0.967	1.685	0.859	1.848	0.752	2.023	0.649	2.206	0.549	2.396	0.456	2.589	0.369	2.783	0.290	2.974
20	1.201	1.411	1.100	1.537	0.998	1.676	0.894	1.828	0.792	1.991	0.691	2.162	0.595	2.339	0.502	2.521	0.416	2.704	0.336	2.885
21	1.221	1.420	1.125	1.538	1.026	1.669	0.927	1.812	0.829	1.964	0.731	2.124	0.637	2.290	0.546	2.461	0.461	2.633	0.380	2.806
22	1.239	1.429	1.147	1.541	1.053	1.664	0.958	1.797	0.863	1.940	0.769	2.090	0.677	2.246	0.588	2.407	0.504	2.571	0.424	2.735
23	1.257	1.437	1.168	1.543	1.078	1.660	0.986	1.785	0.895	1.920	0.804	2.061	0.715	2.208	0.628	2.360	0.545	2.514	0.465	2.670
24	1.273	1.446	1.188	1.546	1.101	1.656	1.013	1.775	0.925	1.902	0.837	2.035	0.750	2.174	0.666	2.318	0.584	2.464	0.506	2.613
25	1.288	1.454	1.206	1.550	1.123	1.654	1.038	1.767	0.953	1.886	0.868	2.013	0.784	2.144	0.702	2.280	0.621	2.419	0.544	2.560
26	1.302	1.461	1.224	1.553	1.143	1.652	1.062	1.759	0.979	1.873	0.897	1.992	0.816	2.117	0.735	2.246	0.657	2.379	0.581	2.513
27	1.316	1.469	1.240	1.556	1.162	1.651	1.084	1.753	1.004	1.861	0.925	1.974	0.845	2.093	0.767	2.216	0.691	2.342	0.616	2.470
28	1.328	1.476	1.255	1.560	1.181	1.650	1.104	1.747	1.028	1.850	0.951	1.959	0.874	2.071	0.798	2.188	0.723	2.309	0.649	2.431
29	1.341	1.483	1.270	1.563	1.198	1.650	1.124	1.743	1.050	1.841	0.975	1.944	0.900	2.052	0.826	2.164	0.753	2.278	0.681	2.396
30	1.352	1.489	1.284	1.567	1.214	1.650	1.143	1.739	1.071	1.833	0.998	1.931	0.926	2.034	0.854	2.141	0.782	2.251	0.712	2.363
31	1.363	1.496	1.297	1.570	1.229	1.650	1.160	1.735	1.090	1.825	1.020	1.920	0.950	2.018	0.879	2.120	0.810	2.226	0.741	2.333
32	1.373	1.502	1.309	1.574	1.244	1.650	1.177	1.732	1.109	1.819	1.041	1.909	0.972	2.004	0.904	2.102	0.836	2.203	0.769	2.306
33	1.383	1.508	1.321	1.577	1.258	1.651	1.193	1.730	1.127	1.813	1.061	1.900	0.994	1.991	0.927	2.085	0.861	2.181	0.796	2.281
34	1.393	1.514	1.333	1.580	1.271	1.652	1.208	1.728	1.144	1.808	1.079	1.891	1.015	1.978	0.950	2.069	0.885	2.162	0.821	2.257
35	1.402	1.519	1.343	1.584	1.283	1.653	1.222	1.726	1.160	1.803	1.097	1.884	1.034	1.967	0.971	2.054	0.908	2.144	0.845	2.236
36	1.411	1.525	1.354	1.587	1.295	1.654	1.236	1.724	1.175	1.799	1.114	1.876	1.053	1.957	0.991	2.041	0.930	2.127	0.868	2.216
37	1.419	1.530	1.364	1.590	1.307	1.655	1.249	1.723	1.190	1.795	1.131	1.870	1.071	1.948	1.011	2.029	0.951	2.112	0.891	2.197
38	1.427	1.535	1.373	1.594	1.318	1.656	1.261	1.722	1.204	1.792	1.146	1.864	1.088	1.939	1.029	2.017	0.970	2.098	0.912	2.180
39	1.435	1.540	1.382	1.597	1.328	1.658	1.273	1.722	1.218	1.789	1.161	1.859	1.104	1.932	1.047	2.007	0.990	2.085	0.932	2.164
40	1.442	1.544	1.391	1.600	1.338	1.659	1.285	1.721	1.230	1.786	1.175	1.854	1.120	1.924	1.064	1.997	1.008	2.072	0.952	2.149
45	1.475	1.566	1.430	1.615	1.383	1.666	1.336	1.720	1.287	1.776	1.238	1.835	1.189	1.895	1.139	1.958	1.089	2.022	1.038	2.088
50	1.503	1.585	1.462	1.628	1.421	1.674	1.378	1.721	1.335	1.771	1.291	1.822	1.246	1.875	1.201	1.930	1.156	1.986	1.110	2.044
55	1.528	1.601	1.490	1.641	1.452	1.681	1.414	1.724	1.374	1.768	1.334	1.814	1.294	1.861	1.253	1.909	1.212	1.959	1.170	2.010
60	1.549	1.616	1.514	1.652	1.480	1.689	1.444	1.727	1.408	1.767	1.372	1.808	1.335	1.850	1.298	1.894	1.260	1.939	1.222	1.984
65	1.567	1.629	1.536	1.662	1.503	1.696	1.471	1.731	1.438	1.767	1.404	1.805	1.370	1.843	1.336	1.882	1.301	1.923	1.266	1.964
70	1.583	1.641	1.554	1.672	1.525	1.703	1.494	1.735	1.464	1.768	1.433	1.802	1.401	1.838	1.369	1.874	1.337	1.910	1.305	1.948
75	1.598	1.652	1.571	1.680	1.543	1.709	1.515	1.739	1.487	1.770	1.458	1.801	1.428	1.834	1.399	1.867	1.369	1.901	1.339	1.935
80	1.611	1.662	1.586	1.688	1.560	1.715	1.534	1.743	1.507	1.772	1.480	1.801	1.453	1.831	1.425	1.861	1.397	1.893	1.369	1.925
85	1.624	1.671	1.600	1.696	1.575	1.721	1.550	1.747	1.525	1.774	1.500	1.801	1.474	1.829	1.448	1.857	1.422	1.886	1.396	1.916
90	1.635	1.679	1.612	1.703	1.589	1.726	1.566	1.751	1.542	1.776	1.518	1.801	1.494	1.827	1.469	1.854	1.445	1.881	1.420	1.909
95	1.645	1.687	1.623	1.709	1.602	1.732	1.579	1.755	1.557	1.778	1.535	1.802	1.512	1.827	1.489	1.852	1.465	1.877	1.442	1.903
100	1.654	1.694	1.634	1.715	1.613	1.736	1.592	1.758	1.571	1.780	1.550	1.803	1.528	1.826	1.506	1.850	1.484	1.874	1.462	1.898
150	1.720	1.747	1.706	1.760	1.693	1.774	1.679	1.788	1.665	1.802	1.651	1.817	1.637	1.832	1.622	1.846	1.608	1.862	1.593	1.877
200	1.758	1.779	1.748	1.789	1.738	1.799	1.728	1.809	1.718	1.820	1.707	1.831	1.697	1.841	1.686	1.852	1.675	1.863	1.665	1.874

\*k' is the number of regressors excluding the intercept

Liite 6. F-testisuureet 5 prosentin luottamusvälillä. (Fisher & Yates, 1974)

$df_2$	$df_1$									
	1	2	3	4	5	6	8	12	24	$\infty$
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	238.9	243.9	249.0	254.3
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.37	19.41	19.45	19.50
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.84	8.74	8.64	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.04	5.91	5.77	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.82	4.68	4.53	4.36
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.15	4.00	3.84	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.73	3.57	3.41	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.44	3.28	3.12	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.23	3.07	2.90	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.07	2.91	2.74	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	2.95	2.79	2.61	2.40
12	4.75	3.88	3.49	3.26	3.11	3.00	2.85	2.69	2.50	2.30
13	4.67	3.80	3.41	3.18	3.02	2.92	2.77	2.60	2.42	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.70	2.53	2.35	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.64	2.48	2.29	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.59	2.42	2.24	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.55	2.38	2.19	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.51	2.34	2.15	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.48	2.31	2.11	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.45	2.28	2.08	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.42	2.25	2.05	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.40	2.23	2.03	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.38	2.20	2.00	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.36	2.18	1.98	1.73
25	4.24	3.38	2.99	2.76	2.60	2.49	2.34	2.16	1.96	1.71
26	4.22	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.32	2.15	1.95	1.69
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.30	2.13	1.93	1.67
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.44	2.29	2.12	1.91	1.65
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.54	2.43	2.28	2.10	1.90	1.64
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.27	2.09	1.89	1.62
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.18	2.00	1.79	1.51
60	4.00	3.15	2.76	2.52	2.37	2.25	2.10	1.92	1.70	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.02	1.83	1.61	1.25
$\infty$	3.84	2.99	2.60	2.37	2.21	2.09	1.94	1.75	1.52	1.00

Source: From Table V of R. A. Fisher and F. Yates, *Statistical Tables for Biological, Agricultural and Medical Research*, published by Longman Group Ltd., London, 1974. (Previously published by Oliver & Boyd, Edinburgh.) Reprinted by permission of the authors and publishers.